JIM BAGGOTT

HIGGS

JIM BAGGOTT

HIGGS

Prefață

Ştirea că ceva foarte asemănător cu bosonul Higgs a fost descoperit la CERN, la Geneva, pe 4 iulie 2012 s-a răspândit instantaneu în jurul lumii ca un virus electronic foarte contagios. Descoperirea a ținut prima pagină a ziarelor, a fost difuzată în multe buletine de ştiri şi a atins audiențe-record. Semnale compatibile cu o particulă care fusese prima dată presupusă sau „inventată“ în 1964 fuseseră în sfârşit găsite, după 48 de ani, cu prețul a multe miliarde de dolari.

Dar de ce atâta zgomot pe tema asta? Ce este bosonul Higgs şi de ce contează el atât de mult? Dacă această nouă particulă este cu adevărat particula Higgs, ce ne spune ea despre lumea materială şi despre evoluția universului timpuriu? A meritat într-adevăr descoperirea ei tot acest efort?

Răspunsurile la aceste întrebări se pot găsi în istoria aşa-numitului „Model Standard“ al fizicii particulelor. După cum îi arată numele, acesta e cadrul pe care fizicienii îl folosesc pentru a interpreta constituenții elementari ai materiei şi forțele care leagă materia sau fac ca ea să se dezintegreze. Este un ansamblu de teorii concepute în mai multe decenii de efort susținut, care reprezintă cele mai reuşite încercări ale fizicienilor de a interpreta lumea din jurul nostru.

Modelul Standard nu este încă o „teorie universală“, a tot ce există. El nu include forța gravitației. În ultimii ani ați citit, poate, despre noi teorii exotice ale fizicii, care încearcă să

unească forțele fundamentale, inclusiv gravitația. Sunt teorii precum supersimetria sau supercorzile. În ciuda eforturilor a sute de teoreticieni angajați în aceste proiecte, asemenea teorii rămân speculative şi nu sunt aproape deloc susținute de dovezi experimentale. Deocamdată, cu toate neajunsurile care au fost recunoscute încă de la crearea sa în anii '70, Modelul Standard rămâne locul principal de desfăşurare a acțiunii reale.

Bosonul Higgs este important în Modelul Standard deoarece implică existența unui câmp Higgs, un câmp de energie altminteri invizibil, care umple întregul univers. Fără câmpul Higgs, particulele elementare din care suntem alcătuiți, voi, eu şi tot universul vizibil, nu ar avea masă. Fără câmpul Higgs, masa nu ar putea fi constituită şi nimic n-ar putea să *existe*.

Se pare că datorăm foarte mult existenței acestui câmp. Iată unul dintre motivele pentru care bosonul Higgs, particula câmpului Higgs, a fost prezentat în presă drept *particula lui Dumnezeu*. Acest nume e considerat total inacceptabil de oamenii de ştiință din domeniu, fiindcă exagerează importanța acestei particule şi atrage atenția asupra relației nu întotdeauna simple dintre fizică şi teologie. Este însă o denumire foarte îndrăgită de ziarişti şi de autorii de ştiință popularizată.

Multe dintre consecințele prezise ale câmpului Higgs au fost confirmate de experimentele din acceleratoarele de particule de la începutul anilor '80. Dar a deduce indirect existența câmpului nu e acelaşi lucru cu a detecta particula sa de câmp care îl dezvăluie. De aceea e extrem de reconfortant să ştim că acest câmp este foarte probabil aici, şi acolo, şi pretutindeni. Posibilitatea ca bosonul Higgs să nu fie descoperit exista efectiv, iar implicațiile pentru Modelul Standard puteau fi catastrofale.

Am început să scriu această carte în iunie 2010, cu doi ani înainte ca descoperirea să fie făcută. Tocmai terminasem manuscrisul altei cărți, intitulată *Povestea cuantică. O istorie în 40 de episoade*, care, aşa cum arată titlul, e o istorie a fizicii cuantice de la 1900 până în prezent. Acea carte prezenta elaborarea

Modelului Standard şi inventarea câmpului şi a particulei Higgs. Cu câteva luni mai devreme, acceleratorul LHC de la CERN atinsese energia-record de şapte mii de miliarde de electronvolți în ciocnirile proton-proton, şi mă aşteptam ca o descoperire *să fie* posibilă în următorii câțiva ani. Din fericire, am avut dreptate.

Povestea cuantică a fost publicată în februarie 2011. Cartea de față se bazează, în parte, pe ea.

Adresez mulțumirile mele Lathei Menon şi conducerii editurii Oxford University Press, care au acceptat să rişte publicând o carte despre o particulă ce nu fusese încă descoperită. Am urmărit evenimentele de la CERN prin canalele oficiale, dar sunt recunoscător şi câtorva bloggeri din fizica energiilor înalte, între care Philip Gibbs, Tommaso Dorigo, Peter Woit, Adam Falkowski, Matt Strassler şi Jon Butterworth. Le mulțumesc lui Jon Butterworth, Sophie Tesauri, James Gillies, Laurette Ponce şi Lyndon Evans pentru că au găsit timp să discute cu mine şi să-mi împărtăşească entuziasmul lor tot mai mare. Doresc să-mi exprim recunoştința față de profesorii David Miller şi Peter Woit, care au citit şi au comentat manuscrisul în faza preliminară, şi față de profesorul Steven Weinberg, care, de asemenea, a citit manuscrisul şi a avut amabilitatea să contribuie cu o perspectivă personală printr-un cuvânt înainte. Vă asigur că erorile care au mai rămas mi se datorează în întregime mie.

Jim Baggott
Reading, 6 iulie 2014

Cuvânt înainte

Multe descoperiri ştiinţifice importante au fost urmate de cărţi de popularizare care explicau aceste descoperiri marelui public. Dar acesta e primul caz din câte cunosc în care o carte a fost scrisă în cea mai mare parte în *aşteptarea* unei descoperiri. Pregătirea acestei cărţi pentru publicare, imediat după anunţul din iulie 2012 privind descoperirea la CERN (confirmată oarecum de Fermilab) a unei noi particule care pare a fi particula Higgs, demonstrează energia şi curajul remarcabil ale lui Jim Baggott şi ale editurii Oxford University Press.

Publicarea promptă a acestei cărţi demonstrează şi interesul mare al publicului pentru această descoperire. De aceea este poate util ca în acest cuvânt înainte să adaug câteva observaţii proprii despre ceea ce tocmai s-a realizat. Se spune adesea că miza în căutarea particulei Higgs este originea masei. Este adevărat, dar această explicaţie necesită câteva precizări.

Prin 1980 aveam o teorie cuprinzătoare acceptabilă a tuturor particulelor elementare observate şi a forţelor (altele decât gravitaţia) care se exercită între ele. Unul dintre elementele esenţiale ale acestei teorii este o simetrie, un fel de relaţie de rudenie, între două dintre aceste forţe, forţa electromagnetică şi forţa nucleară slabă. Electromagnetismul este răspunzător pentru lumină; forţa nucleară slabă permite particulelor din interiorul nucleului atomic să-şi schimbe identitatea în procesele de dezintegrare radioactivă. Această simetrie uneşte cele

două forțe într-o singură structură „electroslabă“. Proprietățile generale ale teoriei electroslabe au fost foarte bine testate; nu valabilitatea lor era miza recentelor experimente de la CERN şi Fermilab, şi ea nu ar fi fost pusă serios la îndoială nici dacă particula Higgs n-ar fi fost descoperită.

Dar una dintre consecințele simetriei electroslabe este că, dacă nu se adaugă nimic teoriei, toate particulele elementare, inclusiv electronii şi cuarcii, ar avea masă nulă, ceea ce desigur nu e adevărat. Aşadar, ceva trebuie să fie adăugat în teoria electroslabă, un nou tip de materie sau de câmp, care nu a fost observat până acum în natură sau în laborator. Căutarea particulei Higgs a fost căutarea răspunsului la întrebarea: ce este această nouă materie de care avem nevoie?

Căutarea acestei noi materii n-a însemnat doar efectuarea unor experimente la marile acceleratoare, aşteptând să se vadă ce apare. Simetria electroslabă, o proprietate exactă a ecuațiilor fundamentale ale fizicii particulelor elementare, trebuie să fie într-un fel ruptă*; ea nu trebuie să se aplice direct particulelor şi forțelor pe care le observăm în realitate. Se ştia încă de la cercetările lui Yoichiro Nambu şi Jeffrey Goldstone din 1960–1961 că ruperea simetriei de acest tip este posibilă în diverse teorii, dar se părea că aceasta ar atrage după sine în mod obligatoriu noi particule fără masă, care se ştia că nu existau.

Au apărut apoi cercetările efectuate independent de Robert Brout şi Francois Englert, de Peter Higgs, de Gerald Guralnik, Carl Hagen şi Tom Kibble, toate din 1964, care au arătat că în anumite clase de teorii aceste particule Nambu–Goldstone fără masă pot să dispară, ele având doar rolul de a da masă particulelor care intermediază forțele.** Exact acest lucru se întâmpla

---

* Termenul *symmetry breaking* (ruperea simetriei) are sensul de încălcare a unei legi de simetrie, după cum e explicat în capitolul 1 al cărții de față. (*N. t.*)

** Pentru concizie, am să numesc aceste lucrări „articolele din 1964“. (*Nota lui Steven Weinberg*.)

în teoria forțelor slabă şi electromagnetică propusă în 1967–1968 de Abdus Salam şi de mine. Dar mai rămânea fără răspuns o întrebare: ce tip nou de materie sau de câmp rupe în realitate simetria electroslabă?

Existau două posibilități. O posibilitate era ca nişte câmpuri până atunci neobservate să umple spațiul vid, şi, exact la fel cum câmpul magnetic al Pământului distinge nordul de alte direcții, aceste noi câmpuri să facă distincția între forțele slabe şi cele electromagnetice, conferind masă particulelor care transmit forța slabă şi celorlalte particule, dar lăsând fotonii (care transmit forța electromagnetică) fără masă. Aceste câmpuri sunt numite „scalare“, ceea ce înseamnă că, spre deosebire de câmpurile magnetice, ele nu disting direcțiile din spațiul obişnuit. Câmpuri scalare de acest tip general au fost introduse în exemplele ilustrative de rupere a simetriei considerate de Goldstone, iar mai târziu în articolele din 1964.

Când Salam şi cu mine am folosit acest gen de rupere a simetriei în construirea teoriei „electroslabe“ moderne a forțelor slabă şi electromagnetică, am presupus că ruperea simetriei se datorează unor câmpuri de acest tip scalar care umplu tot spațiul. (O simetrie de acest fel fusese deja presupusă de Sheldon Glashow şi de Salam împreună cu John Ward, dar nu ca o proprietate exactă a ecuațiilor teoriei, astfel că aceşti teoreticieni nu au fost conduşi spre introducerea câmpurilor scalare.)

Una dintre consecințele teoriilor în care simetriile sunt rupte de nişte câmpuri scalare, între care modelele considerate de Goldstone şi în articolele din 1964, precum şi teoria electroslabă propusă de Salam şi de mine, este că, deşi unele dintre aceste câmpuri servesc doar pentru a da masă particulelor care transmit forța, alte câmpuri scalare se pot manifesta în natură ca nişte particule fizice noi, care ar putea fi create şi observate în acceleratoarele cu țintă fixă sau în cele în care fasciculele de particule accelerate se ciocnesc frontal. Salam şi cu mine am găsit că trebuie să introducem patru câmpuri scalare în teoria noastră

electroslabă. Trei dintre aceste câmpuri scalare erau folosite pentru a da masă particulelor W^+, W^- şi Z^0 – „fotonii grei" –, care în teoria noastră transmit forța slabă (aceste particule au fost descoperite la CERN în 1983–1984 şi s-a găsit că au masele prezise de teoria electroslabă). Dar un câmp scalar rămânea în plus, manifestându-se ca o particulă fizică, un pachet de energie şi impuls al acestui câmp. Aceasta este „particula Higgs" pe care fizicienii o caută de aproape treizeci de ani.

Dar mai exista şi a doua posibilitate: să nu existe nici un câmp scalar nou care să umple spațiul şi nici o particulă Higgs. Simetria electroslabă putea fi în schimb ruptă de nişte forțe puternice, cunoscute sub numele de „forțe tehnicolor", care acționează asupra unor particule prea grele pentru a fi observate deocamdată. Ceva asemănător se întâmplă în supraconductibilitate. Acest tip de teorie a particulelor elementare a fost propus la sfârşitul anilor '70 independent de Leonard Susskind şi de mine, şi ar conduce la o mulțime de noi particule, legate între ele prin forțe tehnicolor. Aceasta era deci alternativa cu care ne confruntam: câmpuri scalare sau forțe tehnicolor?

Descoperirea noii particule constituie un vot foarte puternic în favoarea ruperii simetriei electroslabe prin câmpuri scalare, şi nu prin forțe tehnicolor. De aceea este descoperirea atât de importantă.

Dar mai rămân încă multe de făcut pentru a stabili cu precizie dacă am găsit într-adevăr particula căutată. Teoria electroslabă din 1967–1968 prezice toate proprietățile particulei Higgs, cu excepția masei. Cu masa cunoscută acum experimental, putem calcula probabilitățile tuturor modurilor în care se pot dezintegra particulele Higgs şi putem vedea dacă predicțiile sunt confirmate de experimente ulterioare. Aceasta va dura un timp.

Descoperirea unei noi particule care pare a fi particula Higgs le pune şi teoreticienilor în față o sarcină dificilă, aceea de a-i înțelege masa. Particula Higgs este singura particulă elementară a cărei masă nu apare din ruperea simetriei electroslabe. Din punctul de vedere al principiilor fundamentale ale teoriei

electroslabe, masa particulei Higgs ar putea avea orice valoare. De aceea nici Salam şi nici eu nu am putut s-o prezicem.

De fapt, există un aspect neclar legat de masa particulei Higgs pe care o observăm acum, aspect cunoscut în genere drept „problema ierarhiei“. Deoarece masa particulei Higgs este cea care fixează scala maselor tuturor celorlalte particule elementare cunoscute, am putea presupune că ea trebuie să fie similară cu o altă masă care joacă un rol fundamental în fizică, aşa-numita masă Planck, care este unitatea de masă fundamentală în teoria gravitației (ea reprezintă masa unor particule ipotetice a căror atracție gravitațională ar fi la fel de intensă ca forța electrică dintre doi electroni separați prin aceeaşi distanță). Dar masa Planck este mai mare de circa o sută de mii de bilioane de ori decât masa Higgs. Astfel că, deşi particula Higgs e atât de grea încât a fost necesar un accelerator de particule gigantic pentru a o crea, trebuie totuşi să ne întrebăm de ce este masa ei atât de mică.

*

Jim Baggott mi-a propus să adaug câteva remarci personale privind evoluția ideilor în acest domeniu. Voi menționa doar două remarci.

După cum arată Baggott în capitolul 4, Philip Anderson afirmase mai demult, înainte de 1964, că particulele fără masă Nambu–Goldstone nu sunt o consecință necesară a ruperii simetriei. Atunci, de ce eu şi ceilalți teoreticieni n-am fost convinşi de argumentul lui Anderson? Desigur că asta nu reflecta nicidecum părerea că Anderson nu trebuia luat în serios. Dintre toți teoreticienii care se ocupau de fizica stării condensate, nici unul n-a înțeles mai limpede decât Anderson importanța principiilor de simetrie care s-au dovedit indispensabile în fizica particulelor.

Cred că argumentul lui Anderson a fost în general desconsiderat deoarece se baza pe analogii cu fenomene ca supraconductibilitatea, care sunt nerelativiste (adică, sunt fenomene ce au

loc în domenii în care teoria relativităţii restrânse a lui Einstein poate fi ignorată fără nici un risc). Dar inevitabilitatea particulelor fără masă Nambu–Goldstone fusese dovedită, aparent riguros, de Goldstone, Salam şi de mine, într-o demonstraţie din 1962 care se baza pe valabilitatea manifestă a teoriei relativităţii. Teoreticienii particulelor erau dispuşi să creadă că Anderson avea dreptate în cadrul nerelativist al supraconductivităţii, dar nu şi în teoria particulelor elementare, care include în mod necesar relativitatea. Articolele din 1964 au arătat clar că demonstraţia dată de Goldstone, de Salam şi de mine nu se aplica teoriilor cuantice cu particule care transmit forţe, deoarece, deşi fenomenele fizice din aceste teorii satisfac principiul relativităţii, formularea matematică a acestor teorii în contextul mecanicii cuantice nu satisface acest principiu.

O problemă legată de relativitate a fost şi motivul pentru care nu am reuşit după 1967, în ciuda unor eforturi îndârjite, să demonstrez ceea ce Salam şi cu mine presupusesem, şi anume faptul că infiniţii fără sens care apăreau în teoria electroslabă pot fi eliminaţi, aşa cum se arătase deja doar în teoria electromagnetismului că pot fi eliminaţi infiniţi similari care apar acolo. Relativitatea fusese esenţială în demonstrarea compensării infiniţilor în electromagnetism. Demonstraţia dispariţiei infiniţilor, dată de Gerard 't Hooft în 1971 şi prezentată de Baggott în capitolul 5, folosea tehnici pe care 't Hooft le elaborase împreună cu Martinus Veltman, în care principiile mecanicii cuantice erau extinse pentru a permite formularea teoriei într-un mod compatibil cu relativitatea.

A doua remarcă: Baggott sugerează în capitolul 4 că nu am inclus cuarcii în articolul meu din 1967 care a propus teoria electroslabă deoarece eram preocupat de faptul că teoria ar putea prezice unele procese implicând aşa-numitele particule „stranii“ care nu fuseseră observate în realitate. Aş vrea ca motivul meu să fi fost atât de precis. De fapt, nu am inclus cuarcii în teorie pur şi simplu pentru că în 1967 nu credeam în cuarci.

Nimeni până atunci nu observase vreun cuarc şi era greu de crezut că aceasta se datora faptului că ei ar fi fost mult mai grei decât particulele observate, ca protonii şi neutronii, care se presupuneau a fi alcătuite din cuarci.

Ca mulți alți teoreticieni, nu am acceptat pe deplin existența cuarcilor înainte de articolele din 1973 ale lui David Gross, Frank Wilczek şi David Politzer. Ei au arătat că în teoria cuarcilor şi a forțelor nucleare tari, cunoscută sub numele de cromodinamică cuantică, forța tare scade în intensitate odată cu scăderea distanței. Atunci ne-am dat seama că forța tare dintre cuarci ar putea, contrar intuiției, să devină mai puternică atunci când distanța dintre cuarci creşte, poate în aşa măsură încât chiar să împiedice cuarcii să se separe unul de altul. Nu există încă o demonstrație a acestui fapt, dar el este acceptat în general. Cromodinamica cuantică este acum o teorie foarte bine testată, deşi nimeni n-a văzut vreodată un cuarc izolat.

Am fost foarte bucuros să constat că povestea din această carte începe în primii ani ai secolului XX cu Emmy Noether, care şi-a dat seama înaintea tuturor de importanța principiilor de simetrie din natură. Aceasta ne ajută să ne amintim că munca oamenilor de ştiință de azi este doar ultimul pas dintr-o splendidă tradiție, aceea de a încerca să aflăm cum funcționează natura, supunându-ne mereu presupunerile testării experimentale. Cartea lui Jim Baggott ar trebui să transmită cititorului ceva din spiritul acestei minunate aventuri istorice.

Steven Weinberg
6 iulie 2012

PROLOG

Formă şi substanţă

Din ce e alcătuită lumea?

Întrebări simple ca aceasta au frământat minţile oamenilor de când omenirea a ajuns la gândirea raţională. Desigur, felul în care punem azi această întrebare e mult mai detaliat şi mai complicat, iar răspunsurile au devenit mult mai complexe şi mai profunde. Dar nu încape îndoială că, în esenţă, întrebarea rămâne una foarte simplă.

Acum două mii cinci sute de ani, filozofii Greciei antice erau călăuziţi doar de ideea de frumos şi armonie în natură şi de forţa raţionamentului logic şi a imaginaţiei, aplicate lucrurilor pe care le puteau percepe doar cu simţurile. Privind în urmă, e de-a dreptul extraordinar cât de multe au putut înţelege.

Grecii făceau distincţia dintre formă şi substanţă. Lumea e alcătuită dintr-o substanţă materială care poate lua o diversitate de forme. Filozoful Empedocle, care a trăit în Sicilia în secolul V î.Cr., credea că această diversitate putea fi redusă la patru forme fundamentale, pe care le numim astăzi „elementele clasice“. Acestea erau pământul, aerul, focul şi apa. Elementele erau considerate eterne şi indestructibile, se puteau uni în combinaţii prin forţa de atracţie a Iubirii şi se puteau despărţi prin forţa de respingere a Dezbinării, pentru a alcătui tot ce există în lume.

Altă şcoală de gândire, iniţiată de filozoful din secolul V î.Cr. Leucip (şi asociată mai mult cu Democrit, discipolul său), susţinea că lumea e alcătuită din particule materiale minuscule,

indivizibile şi indestructibile (numite atomi) şi din spaţiu gol (vid). Atomii erau cărămizile întregii substanţe materiale, răspunzătoare pentru toată materia. Existenţa atomilor este în principiu necesară, susţinea Leucip, deoarece, evident, substanţa nu poate fi divizată în mod indefinit. Dacă aşa ceva ar fi posibil, atunci am putea diviza substanţa la nesfârşit, până n-am mai obţine nimic, ceea ce contrazice legea conservării materiei, care pare irefutabilă.

Un secol mai târziu, Platon a elaborat o teorie în care explica modul în care atomii (substanţa) sunt structuraţi pentru a alcătui cele patru elemente (formele). El a reprezentat fiecare dintre cele patru elemente printr-un corp geometric („platonician"), şi a susţinut în *Timaios* că feţele fiecărui corp pot fi descompuse mai departe în sisteme de triunghiuri, reprezentând atomii constituenţi ai elementelor. Dacă rearanjăm dispunerea triunghiurilor – rearanjăm atomii –, putem să transformăm un element în altul şi să combinăm elementele pentru a produce noi forme.*

Pare logic că trebuie să existe nişte constituenţi ultimi, o realitate incontestabilă aflată la baza lumii pe care o vedem în jurul nostru şi care îi conferă structură şi formă. Dacă materia ar fi divizibilă la nesfârşit, atunci am atinge un punct în care constituenţii înşişi ar deveni aproape efemeri – până la a nu mai exista deloc. Atunci n-ar mai exista cărămizi constituente şi am rămâne doar cu interacţiile dintre nişte fantome imateriale, imposibil de definit, care creează *iluzia* substanţei.

Oricât de surprinzător ar părea, în mare măsură tocmai acest lucru ne spune fizica modernă. Masa, credem noi astăzi, nu e

---

* Vezi Platon, *Timeaus and Critias*, Penguin, London 1971, pp. 73–87. [Pentru ediţia românească vezi Platon, *Opere complete IV* (Editura Humanitas, Bucureşti, 2004), pp. 319–331.] Platon a construit aerul, focul şi apa dintr-un tip de triunghiuri, iar pământul dintr-un alt tip. Prin urmare, Platon credea că pământul nu poate fi transformat în alte elemente. (*N. a.*)

o proprietate intrinsecă sau o însuşire „primă“ a cărămizilor ultime ale naturii. De fapt, masa nici nu există ca atare. Ea este construită în întregime din energia interacțiilor dintre particulele elementare, care în mod natural nu au masă.

Fizicienii au continuat să dividă materia, iar în cele din urmă n-au găsit chiar nimic.

*

Abia după apariția unei filozofii experimentale riguroase, la începutul secolului XVII, a fost depăşit acel tip de gândire speculativă din teoriile grecilor antici. Vechea filozofie încercase să intuiască natura substanței materiale din observații contaminate de prejudecăți despre felul în care *trebuie* să fie lumea. Noii oameni de ştiință se luptau cu natura însăşi, străduindu-se să obțină dovezi privind felul în care este lumea *în realitate*.

Întrebările se refereau în principal tot la natura formei şi a substanței. Conceptul de masă – o măsură a *cantității* de materie, aşa cum se manifestă ea în mişcările corpurilor – a devenit esențial pentru înțelegerea substanței. Rezistența unui corp la accelerare e interpretată ca masă inerțială. Dacă sunt lovite cu aceeaşi forță, un corp mic va fi mai puternic accelerat decât unul mare.

Capacitatea unui corp de a genera un câmp gravitațional e interpretată ca masă gravitațională. Forța gravitațională produsă de Lună e mai slabă decât forța gravitațională produsă de Pământ, deoarece Luna e mai mică, deci are o masă gravitațională mai mică. Experiența arată că masa inerțială şi cea gravitațională sunt identice, deşi nu există un motiv teoretic riguros ca lucrurile să stea aşa.

Oamenii de ştiință au dezvăluit, de asemenea, secretele marii diversități de forme ale naturii. S-a dovedit că apa, „elementul“ fundamental al grecilor, nu e alcătuită din corpuri geometrice compuse din triunghiuri, aşa cum credea Platon, ci din molecule compuse din atomii elementelor chimice hidrogen şi oxigen, într-o combinație pe care o scriem azi ca H_2O.

Această utilizare modernă a cuvântului „atom“ amintea la început de interpretarea dată de greci – cărămidă indivizibilă

a materiei. Dar, chiar pe când realitatea atomilor era aprig dezbătută, fizicianul englez Joseph John Thompson descoperea în 1897 electronul de sarcină electrică negativă. Se părea că atomii, la rândul lor, aveau în interior constituenți subatomici.

Descoperirea lui Thompson a fost urmată în anii 1909–1911 de experimente efectuate de neozeelandezul Ernest Rutherford în laboratorul din Manchester. Acestea au arătat că atomii sunt alcătuiți, în cea mai mare parte, din spațiu vid. În centrul atomului se află un nucleu minuscul, încărcat pozitiv, în jurul căruia se mişcă pe orbite electronii încărcați negativ, la fel ca planetele în jurul Soarelui. Cea mai mare parte a masei atomilor care formează substanța materială e concentrată în nucleele atomice. Prin urmare, în nucleu sunt îngemănate forma şi substanța.

Modelul „planetar“ al atomului rămâne o metaforă vizuală atrăgătoare chiar şi în zilele noastre. Dar curând a devenit limpede pentru fizicieni că un asemenea model este de fapt absurd. Astfel de atomi planetari era de aşteptat să fie intrinsec instabili. Spre deosebire de planetele care se mişcă în jurul Soarelui, particulele încărcate electric care se mişcă într-un câmp electric radiază energie sub formă de unde electromagnetice. Asemenea electroni planetari şi-ar epuiza energia într-o fracțiune de secundă, iar apoi arhitectura internă a atomului s-ar prăbuşi.

Lămurirea acestui mister a apărut sub forma mecanicii cuantice, la începutul anilor ’20. Electronul nu este doar o particulă – pe care am putea să ne-o închipuim ca pe o mică bilă de materie încărcată negativ –, ci este în acelaşi timp atât undă, *cât şi* particulă. El nu se află „aici“ sau „acolo“, aşa cum ne-am aştepta să fie un fragment de materie localizat, ci practic „oriunde“ în interiorul fantomaticei sale funcții de undă nelocalizate. Electronii nu se mişcă propriu-zis în jurul nucleului, ci funcțiile lor de undă formează structuri tridimensionale caracteristice – pe care le numim „orbitali“ – în spațiul din jurul nucleului. Forma matematică a fiecărui orbital dă *probabilitatea* de a găsi misteriosul electron în anumite locuri – „aici“ sau „acolo“ – în interiorul atomului (vezi figura 1).

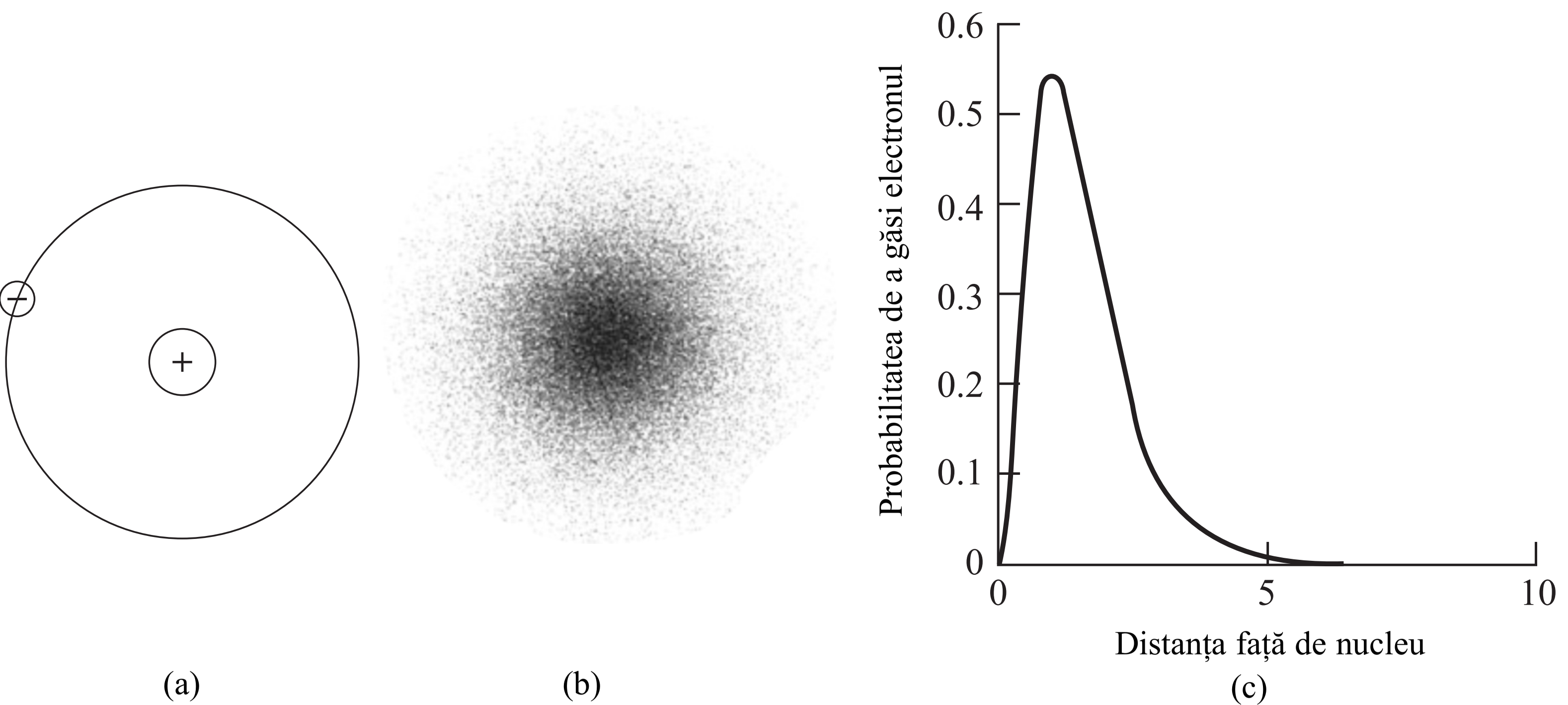


Figura 1. (a) În modelul „planetar“ al lui Rutherford pentru atomul de hidrogen, un singur electron încărcat negativ ocupă o orbită fixă în jurul nucleului, care constă dintr-un singur proton încărcat negativ. (b) Mecanica cuantică a înlocuit electronul de pe orbită cu funcția de undă a electronului, care, pentru configurația de energie minimă (1s), este sferic simetrică. (c) Electronul poate fi „găsit“ acum oriunde în cuprinsul funcției de undă, dar are probabilitatea maximă de a se găsi la distanța prezisă de vechiul model planetar.

Revoluția cuantică a fost o perioadă de o fecunditate fără precedent atât în fizica experimentală, cât şi în cea teoretică. Când, în 1927, fizicianul englez Paul Dirac a combinat mecanica cuantică cu teoria relativității restrânse a lui Albert Einstein, a apărut o nouă proprietate numită *spinul electronului*. Era de fapt o proprietate deja cunoscută experimentatorilor, care o interpretau presupunând că electronul se învârte în jurul axei proprii ca un titirez, la fel cum Pământul se învârte în jurul axei sale în timp ce se roteşte în jurul Soarelui (vezi figura 2).

S-a văzut însă curând că aceasta era o altă metaforă vizuală fără temei în realitate. Astăzi interpretăm spinul electronului ca pe un efect cuantic pur „relativist“, în care electronul poate avea una din două „orientări“ posibile, pe care le numim spinul în sus şi spinul în jos. Ele nu sunt orientări după nişte direcții din spațiul tridimensional convențional, ci orientări într-un „spațiu al spinului“, care are doar două direcții – în sus şi în jos.

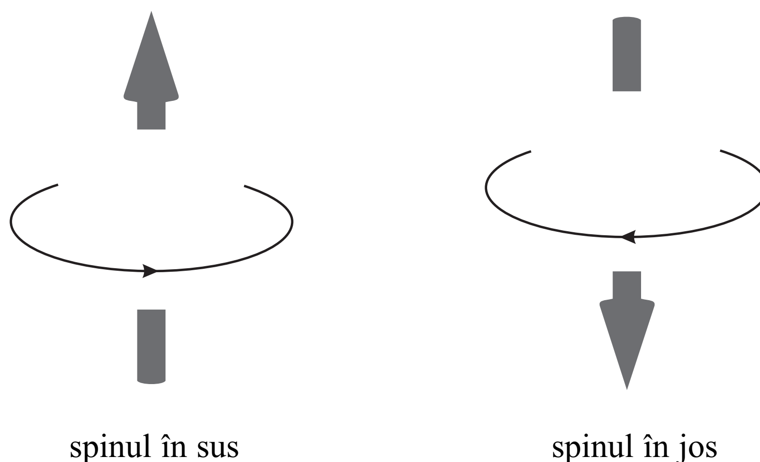


Figura 2. În 1927, Dirac a unit mecanica cuantică cu teoria relativității restrânse a lui Einstein, pentru a crea o teorie cuantică complet „relativistă“. De aici a apărut proprietatea numită spinul electronului, explicată prin presupunerea că electronul încărcat negativ se învârte efectiv în jurul axei sale, producând în acest fel un mic câmp magnetic local. Astăzi interpretăm spinul electronului doar în funcție de orientările lui posibile – spinul în sus şi spinul în jos.

S-a constatat că fiecare orbital dintr-un atom conţine doi – şi numai doi – electroni. Acesta e faimosul *principiu de excluziune* al fizicianulul austriac Wolfgang Pauli, formulat în 1925, şi care afirmă că electronilor le e interzis să ocupe simultan aceeaşi stare cuantică. Principiul decurge din forma matematică a funcţiei de undă pentru orice stare compusă din doi sau mai mulţi electroni. Dacă presupunem că starea compusă ar fi creată cu doi electroni având exact aceleaşi caracteristici fizice, atunci funcţia de undă ar avea amplitudine zero – o asemenea stare n-ar putea exista. Pentru ca o funcţie de undă cu amplitudine nenulă să existe, cei doi electroni trebuie să fie diferiţi în anumite privinţe. Într-un orbital atomic, asta înseamnă că un electron trebuie să aibă orientarea spinului în sus, iar celălalt trebuie să aibă orientarea spinului în jos. Cu alte cuvinte, spinii lor trebuie să fie *împerecheaţi*.

E mai prudent să rezistăm tentaţiei de a ne imagina cum arată în realitate aceste orientări diferite. Efectele lor sunt însă cât se poate de reale. Spinul determină valoarea momentului cinetic al electronului – partea asociată cu mişcarea „de rotaţie“ a spinului său. Spinul determină de asemenea felul în care electronul interacţionează cu un câmp magnetic, prin efecte ce pot fi studiate în detaliu în laborator. Dar în mecanica cuantică se pare că am trecut pragul dintre ceea ce putem şti şi ceea ce nu putem şti despre originea acestor efecte.

Teoria cuantică relativistă a lui Dirac a produs, de asemenea, un număr dublu de soluţii faţă de câte credea el că sunt necesare. Două dintre aceste soluţii corespund orientărilor spinului electronului, în sus şi în jos. Dar la ce corespund celelalte două soluţii? Dirac a avut câteva idei proprii, dar în cele din urmă, în 1931, a admis că ele trebuiau să reprezinte orientările în sus şi în jos ale spinului unui electron încărcat cu sarcină pozitivă, necunoscut până atunci. Dirac descoperise antimateria. „Pozitronul“, antiparticula electronului, a fost găsit ulterior în experimente cu raze cosmice, formate la mare altitudine în

atmosfera Pământului, în ciocniri care implicau particule de energii înalte.

În 1932 se părea că ultima piesă a puzzle-ului fusese găsită. Fizicianul englez James Chadwick descoperise neutronul, o particulă neutră din punct de vedere electric, care stă cuibărită alături de protonul încărcat pozitiv în interiorul nucleului atomic. Se părea că fizicienii aveau acum toate ingredientele pentru a formula un răspuns definitiv la întrebarea noastră de la început.

Răspunsul suna cam aşa: toată substanţa materială e alcătuită din elemente chimice. Aceste elemente apar într-o varietate de forme care constituie tabelul periodic, de la cel mai uşor, hidrogenul, până la cel mai greu element cunoscut care apare în natură, uraniul.*

Fiecare element e alcătuit din atomi. Fiecare atom e alcătuit dintr-un nucleu conţinând un număr variabil de protoni încărcaţi pozitiv şi neutroni neutri electric. Fiecare element e caracterizat prin numărul de protoni din nucleele atomilor săi. Hidrogenul are unul, heliul doi, litiul trei şi aşa mai departe, până la uraniu, care are 92.

În jurul nucleului se află electroni încărcaţi negativ, în număr egal cu cel al protonilor, astfel încât nucleul în ansamblul său este neutru din punct de vedere electric. Fiecare electron poate avea spinul orientat în sus sau în jos, iar fiecare orbital poate conţine doi electroni, cu condiţia ca spinii lor să fie împerecheaţi.

Este un răspuns foarte cuprinzător. Cu cărămizile fundamentale – protoni, neutroni şi electroni – şi cu principiul de excluziune al lui Pauli, putem explica de ce tabelul periodic are structura pe care o are. Putem explica de ce materia are formă şi densitate. Putem explica existenţa izotopilor – atomi cu acelaşi număr de protoni, dar cu un număr diferit de neutroni în

---

* Există elemente mai grele decât uraniul, dar acestea nu se găsesc în natură. Ele sunt intrinsec instabile, şi de aceea trebuie produse artificial în laborator sau într-un reactor nuclear. Plutoniul este probabil cel mai bine-cunoscut exemplu. (*N. a.*)

nucleele lor. Cu puțin efort, putem explica toată chimia, biochimia şi ştiința materialelor.

În această descriere, masa nu e un mister. Masa întregii substanțe materiale se reduce la cea a protonilor şi neutronilor din alcătuirea ei, care contribuie cu aproape 99% din masa fiecărui atom.

Imaginați-vă un mic cub de gheață format din apă triplu distilată. Laturile lui măsoară 2,7 centimetri, puțin peste un inch. Țineți-l în mână. E rece şi alunecos. Nu este greu, şi totuşi simțiți greutatea lui în palmă. Unde se află deci masa cubului?

Greutatea moleculară a apei se calculează simplu, din numărul total de protoni şi neutroni din nucleele celor doi atomi de hidrogen şi nucleul atomului de oxigen care formează H_2O. Nucleul fiecărui atom de hidrogen constă doar dintr-un proton, iar nucleul atomului de oxigen conține opt protoni şi opt neutroni, ceea ce înseamnă în total 18 „nucleoni". Cubul de gheață pură pe care îl țineți în mână va cântări circa 18 grame*, ceea ce este egal cu greutatea moleculară exprimată în grame. De aceea cubul reprezintă o unitate de măsură standard pentru apa solidă, cunoscută sub numele de „mol".

Ştim că un mol de substanță conține un număr fix de atomi sau de molecule din care este alcătuită acea substanță. Acesta e numărul lui Avogadro, puțin peste 600 de miliarde de bilioane (6×10^{23}). De aici rezultă răspunsul. Greutatea cubului de gheață pe care o simțiți în palmă este rezultatul combinat al maselor a 600 de miliarde de bilioane de molecule de H_2O, sau a circa 10 800 de miliarde de bilioane de protoni şi neutroni (vezi figura 3).**

* Densitatea apei pure la 0° este de 0,9167 grame pe centimetru cub. Cubul de gheață are un volum de aproximativ 19,7 centimetri cubi, aşadar masa lui va fi cu puțin peste 18 grame. (*N. a.*)

** Desigur, trebuie să avem grijă să facem deosebirea dintre greutate şi masă. Cubul de gheață *cântăreşte* 18 grame pe Pământ, dar cântăreşte mult mai puțin pe Lună, şi nu are deloc greutate dacă se roteşte

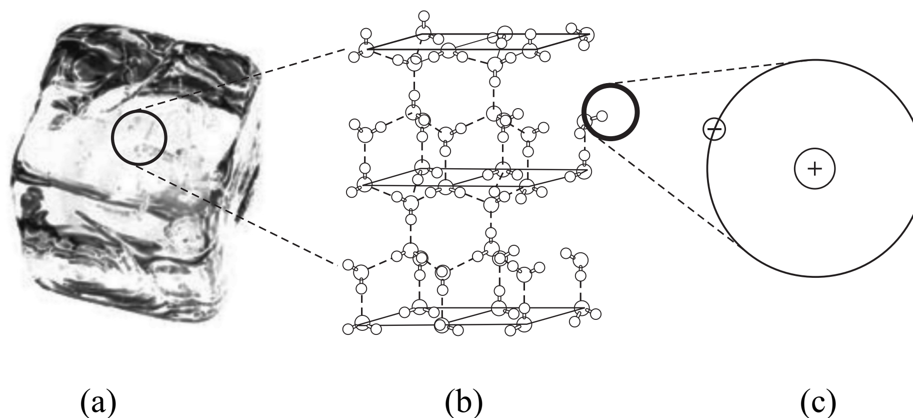


Figura 3. Un cub de gheață cu latura de 2,7 centimetri va cântări circa 18 grame (a). El constă dintr-o rețea care conține puțin peste 600 de miliarde de bilioane de molecule de apă, H_2O (b). Fiecare atom de oxigen conține opt protoni şi opt neutroni, iar fiecare atom de hidrogen conține un proton (c). Cubul de gheață conține deci aproximativ 10 800 de miliarde de bilioane de protoni şi neutroni.

A trebuit să se accepte faptul că atomii nu mai sunt indestructibili, aşa cum crezuseră odinioară grecii. Atomii puteau trece dintr-o formă în alta. În anul 1905, Einstein a folosit teoria relativității restrânse pentru a arăta că masa şi energia sunt echivalente, prin ceea ce avea să devină cea mai celebră ecuație ştiințifică a omenirii, $E = mc^2$: energia este egală cu masa înmulțită cu viteza luminii la pătrat. Dar, departe de a submina conceptul de masă, ideea că masa reprezintă un vast rezervor de energie l-a făcut şi mai real.

Real, dar nu imuabil. Einstein a arătat că materia (masa) nu se conservă – ea poate fi transformată în energie. Când un atom de uraniu-235 fisionează în urma bombardamentului cu un neutron rapid, circa o cincime din masa unui proton se transformă în energie, în reacția nucleară care rezultă. La scara unei bombe

---

pe o orbită în jurul Pământului. *Masa* lui însă rămâne riguros aceeaşi. Prin convenție, stabilim că masa unui corp este egală cu greutatea lui pe Pământ. (*N. a.*)

de 56 kg de uraniu-235 cu puritatea de 90%, cantitatea de energie eliberată a fost suficientă pentru a distruge complet oraşul japonez Hiroshima, în august 1945.

Dar Einstein căuta de fapt un adevăr şi mai profund. Un indiciu apare în titlul articolului său din 1905: „Depinde oare inerția unui corp de conținutul său în energie?“[1] Einstein înțelesese că relația $E = mc^2$ înseamnă în realitate că $m = E/c^2$: întreaga masă inerțială este doar o formă de energie.* Consecințele profunde ale acestei observații nu vor deveni limpezi decât peste şaizeci de ani.

*

La mijlocul anilor '30, cărămizile fundamentale – protoni, neutroni şi electroni – păreau să ofere un răspuns complet la întrebarea noastră de la început. Dar mai exista o problemă. Încă de la sfârşitul secolului XIX se ştia că izotopii anumitor elemente sunt instabili. Ei sunt radioactivi: nucleele lor se dezintegrează spontan printr-o serie de reacții nucleare.

Există diverse tipuri de radioactivitate. Unul dintre ele, pe care Rutherford l-a numit în 1899 radioactivitate beta, implică transformarea unui neutron din nucleu într-un proton, transformare însoțită de emisia unui electron de mare viteză (o particulă „beta“). Aceasta e o formă naturală de alchimie: schimbând numărul de protoni din nucleu, se schimbă automat identitatea lui chimică.**

Din radioactivitatea beta rezulta că neutronul este o particulă instabilă, compusă, care nu e în realitate „fundamentală“. Mai apărea şi o problemă cu bilanțul energiei în acest proces. Energia eliberată prin transformarea unui neutron în interiorul nucleului, cunoscută teoretic, nu se regăsea în întregime în energia

---

* De fapt, relația $E = mc^2$ nu apare în această formă în articolul lui Einstein. (*N. a.*)

** Din fericire pentru valoarea rezervelor de aur ale omenirii, radioactivitatea nu reprezintă un mod ieftin de a transforma metalele obişnuite în aur. (*N. a.*)

electronului emis. În 1930, Pauli a intuit că nu avea altă soluție decât să presupună că energia „lipsă“ din reacție era preluată de o particulă ușoară, fără sarcină electrică, neobservată până atunci, care în cele din urmă a fost numită *neutrin* (adică, ceva „mic și neutru“). La acel moment se credea că ar fi imposibil să fie detectată o asemenea particulă, dar ea a fost descoperită în 1956.

Era momentul să se facă inventarul. Câteva lucruri erau clare. Materia se bazează pe *forță* pentru a fi menținută în stare stabilă. În afară de forța gravitațională, care acționează universal asupra întregii materii, se considera că există alte trei tipuri de forțe care acționează în interiorul atomului.

Interacțiile dintre particulele încărcate electric rezultă din forța electromagnetică, bine cunoscută din lucrările de pionierat ale fizicienilor secolului XIX, care, printre multe alte realizări remarcabile, au pus bazele industriei electrotehnice. O teorie cuantică total relativistă a câmpului electromagnetic, numită

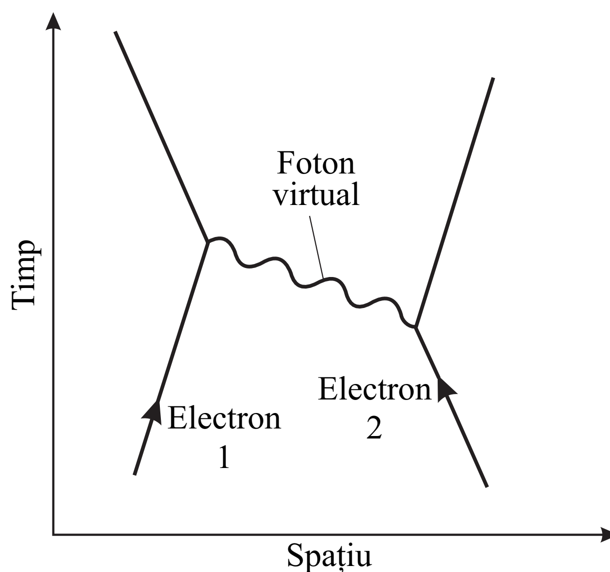


Figura 4. Reprezentarea interacției dintre doi electroni, așa cum e descrisă de electrodinamica cuantică. Forta electromagnetică de respingere dintre doi electroni încărcați negativ presupune schimbul unui foton virtual în punctul de apropiere maximă. Fotonul este „virtual“, deoarece nu e vizibil în timpul interacției.

electrodinamica cuantică*, a fost elaborată în 1948 de fizicienii americani Richard Feynman şi Julian Schwinger, şi de fizicianul japonez Sin-Itiri Tomonaga. În electrodinamica cuantică, forțele de atracție şi de respingere dintre particulele încărcate electric sunt „purtate“ de aşa-numitele particule de forță.

De exemplu, atunci când doi electroni se apropie unul de altul, ei schimbă o particulă de forță care îi face să se respingă reciproc (vezi figura 4). Purtătorul forței câmpului electromagnetic este fotonul, particula cuantică din care e alcătuită lumina obişnuită. Electrodinamica cuantică a ajuns repede să se impună ca o teorie cu o putere de predicție fără precedent.

Mai existau încă alte două forțe de luat în considerare. Electromagnetismul nu putea explica felul în care protonii şi neutronii sunt legați între ei în interiorul nucleului atomic, şi nici interacțiile asociate cu dezintegrarea radioactivă beta. Aceste forțe acționează la scări de energie atât de diferite, încât nu pot fi reduse la una singură. S-a constatat că sunt necesare două forțe, o forță nucleară „tare“, răspunzătoare pentru menținerea nucleelor atomice, şi o forță nucleară „slabă“, care guvernează anumite transformări nucleare.

*

Ajungem astfel la perioada din istoria fizicii care va fi prezentată în această carte. Următorii şaizeci de ani de fizică a particulelor, experimentală şi teoretică, ne-au condus la Modelui Standard, un ansamblu de teorii cuantice de câmp fundamentale care descriu toată materia şi toate forțele dintre particulele materiale, cu excepția gravitației. Cea mai simplă cale de a afla ce este Modelul Standard şi ce înseamnă el pentru felul în care înțelegem lumea materială este să facem un tur rapid prin istoria lui.

Călătoria noastră începe în 1916, în liniştitul orăşel universitar german Göttingen.

---

* În engleză, Quantum Electrodynamics, prescurtat QED. (*N. t.*)

PARTEA I
Inventarea

CAPITOLUL 1
Poezia ideilor logice

În care matematiciana germană Emmy Noether descoperă legătura dintre legile de conservare şi simetriile profunde ale naturii.

Cred că suntem de acord că unul dintre scopurile ştiinţei este să explice din ce e alcătuită lumea şi de ce este ea aşa cum este. Ca atare, ea caută să descopere constituenţii fundamentali ai materiei şi legile naturii care le guvernează comportamentul.

Dacă putem cădea de acord în această privinţă, atunci va trebui să admitem că nu toate „legile“ sunt la fel. Nu toate legile sunt cu adevărat fundamentale. În secolul XVII, Johannes Kepler a studiat timp de mulţi ani datele astronomice adunate sârguincios de Tycho Brahe şi a conceput în cele din urmă trei legi care guvernează mişcările planetelor în jurul Soarelui. Aceste legi sunt foarte puternice, dar ele escamotează explicaţia mai profundă, motivul pentru care planetele se rotesc în jurul Soarelui în felul în care o fac. Legea gravitaţiei universale a lui Newton a furnizat tocmai o astfel de explicaţie. Legea lui Newton a rezistat pe poziţii timp de alte trei sute de ani, pentru a fi înlocuită de interdependenţa dintre materie şi spaţiul-timp curbat, în teoria generală a relativităţii a lui Einstein.

Prin urmare, ce sunt legile „fundamentale“? Poate că nu e prea greu de dat un răspuns. Mult din ceea ce înţelegem despre natura lumii noastre se întemeiază pe câteva legi de *conservare* aparent simple. Vechii greci credeau că materia se conservă şi erau foarte aproape de adevăr. Einstein ne-a învăţat mai târziu că materia poate fi redusă la energie şi că din energie poate să apară materie.

Materia (sub forma substanței materiale) nu se conservă, dar ansamblul masă-energie se conservă. Oricât am încerca, nu putem crea sau distruge energia. Putem doar s-o transformăm dintr-o formă în alta. În orice interacție fizică, oricum ar fi ea descrisă, energia se conservă.

La fel stau lucrurile şi cu impulsul, masa unui corp înmulțită cu viteza lui pe o traiectorie dreaptă. La prima vedere, această conservare pare a fi contrazisă de experiența cotidiană. Într-un *montagne russe* din parcurile de distracții li se imprimă amatorilor de senzații tari o viteză orizontală mare de-a lungul unei piste.* Pista face o buclă completă în plan vertical. Vagonul care poartă pasagerii urcă o rampă abruptă, pierzând din impuls până când se opreşte. Gravitația îl trage în jos de-a lungul rampei. Vagonul capătă impuls şi face o buclă completă până în punctul inițial, unde ajunge în final în repaus. Pare destul de clar că impulsul nu se conservă în timp ce vagonul urcă pe rampă şi se opreşte.

Dar lucrurile sunt mai complicate aici. Pe măsură ce vagonul îşi pierde impulsul, restul lumii de sub el şi de care este legat imperceptibil câştigă impuls, astfel încât impulsul total se conservă cu adevărat.

La fel se întâmplă şi cu momentul cinetic (sau unghiular) al corpurilor care se rotesc, definit ca impulsul liniar înmulțit cu distanța până la centrul de rotație. O patinatoare începe o piruetă cu brațele întinse şi un picior ridicat lateral. Pe măsură ce îşi strânge brațele şi piciorul înapoi către centrul ei de masă, ea reduce distanța până la centrul de rotație şi se învârte mai repede. Aceasta e conservarea momentului cinetic în acțiune.

Aşa cum arată exemplul legat de impuls, aceste legi de conservare nu sunt prea lesne de sesizat intuitiv. Timp de multe

---

* M-am dat într-un asemenea *montagne russe* pe când eram cercetător post-doctoral în California, la începutul anilor ’80. Cred că se numea „Mareea“. (*N. a.*)

secole s-a bănuit existența lor, dar pentru a formula clar o lege de conservare e nevoie să precizăm mai întâi ce mărime se conservă. Iar conceptul de energie a fost formalizat şi înțeles corect abia în secolul XIX.

Legile de conservare, aşa cum ne apar astăzi, reprezintă apogeul a secole de încercări şi eşecuri experimentale şi teoretice. Deşi sunt fundamentale, într-un anume sens aceste legi sunt totuşi empirice – ele decurg din observații şi experimente, iar nu din vreun model teoretic profund, fundamental al lumii. Există oare un principiu mai adânc din care să rezulte automat conservarea energiei şi a impulsului?

În 1915, matematiciana germană Amalie Emmy Noether credea cu tărie că aşa stau lucrurile.

*

Emmy Noether s-a născut la Erlangen, în Bavaria, în martie 1882. Tatăl ei, Max, era matematician la Universitatea din Erlangen, iar în 1900 Emmy era una din cele două studente care frecventau universitatea. Ca mai toate instituțiile academice din Germania de la acea vreme, universitatea nu voia să încurajeze femeile să devină studente, şi Emmy era obligată să ceară mai întâi permisiunea profesorilor pentru a asista la cursurile lor.

După ce a absolvit în vara lui 1903, ea şi-a petrecut lunile de iarnă la Universitatea din Göttingen. Aici a urmărit prelegerile ținute de câțiva dintre matematicienii de frunte ai Germaniei, printre care David Hilbert şi Felix Klein. S-a întors apoi la Erlangen ca să lucreze la teza de licență, iar în 1908 a devenit lector fără salariu la universitate.

Şi-a arătat interesul față de cercetările lui Hilbert şi a publicat câteva articole care extindeau unele metode de algebră abstractă ale acestuia. Atât Hilbert, cât şi Klein au fost impresionați, iar la începutul lui 1915 au încercat s-o aducă înapoi la Göttingen, pentru a lucra la facultate.

Dar s-au lovit de o rezistență îndârjită. „Ce vor gândi soldații noştri când se vor întoarce la universitate şi vor afla că li se cere să învețe la picioarele unei femei?“ strigau conservatorii.

„Nu văd de ce sexul candidatului este un argument împotriva admiterii sale ca *Privatdozent* [profesor asistent]“, a replicat Hilbert. „La urma urmei, suntem o universitate, nu o baie publică.“[1] Hilbert a avut câştig de cauză, şi Noether s-a mutat la Göttingen în aprilie 1915.

La scurt timp după ce a ajuns la Göttingen, Noether a formulat ceea ce avea să devină una dintre cele mai celebre teoreme din fizică.

*

Noether a dedus că principiile de conservare a mărimilor fizice precum impulsul şi energia pot fi deduse din felul în care se comportă legile care descriu sistemul la acțiunea anumitor transformări continue de simetrie. Legile de conservare sunt manifestări ale simetriilor profunde ale naturii.

Avem tendința să ne gândim la simetrie în funcție de reflexiile în oglindă: stânga-dreapta, sus-jos, față-spate. Spunem că un lucru e simetric dacă apare la fel de-o parte şi de alta a unui centru sau a unei axe de simetrie. În acest caz, o „transformare“ de simetrie este acțiunea de reflectare unui obiect ca într-o oglindă. Dacă obiectul rămâne neschimbat (sau „invariant“) după o astfel de reflexie, spunem că e simetric.

De exemplu, se pare că simetria facială este adânc înrădăcinată în felul în care percepem frumusețea şi puterea de seducție, servind drept indiciu subliminal asupra calității genetice. Oamenii considerați frumoşi au fețe mai simetrice şi, în general, dorim să ne împerechem cu cei pe care îi considerăm frumoşi (vezi figura 5).*

---

* Există unele indicii care sugerează că într-adevăr corpul femeilor devine mai simetric în cele 24 de ore dinaintea ovulației. Vezi Brian Bates and Jogh Cleese, *The Human Face*, BBC Books, London, 2001, p. 149. (*N. a.*)

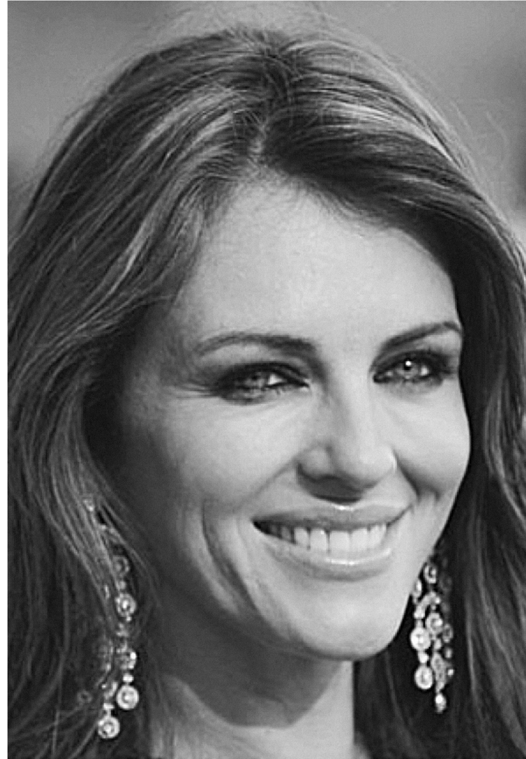


Figura 5. Avem tendința să ne gândim la simetrie în funcție de reflexiile în oglindă şi spunem că un lucru e simetric dacă arată la fel de-o parte sau de alta a unui centru sau a unei axe de simetrie. Elisabeth Hurley ilustrează relația dintre simetria facială şi frumusețea clasică. Sursa: ©Peter Steffen/dpa/Corbis

Spunem că aceste exemple de transformări de simetrie sunt „discrete“. Ele implică un „salt“ instantaneu de la o perspectivă la alta, de pildă de la stânga la dreapta. Transformările de simetrie la care se referă teorema lui Noether sunt foarte diferite de acestea. Ele implică schimbări continue, treptate, cum este o rotație continuă pe un cerc. Este evident că, dacă rotim un cerc cu un unghi infinitezimal măsurat din centrul său, atunci cercul rămâne neschimbat. Cercul este simetric în raport cu transformările de rotație continue. Un pătrat nu este simetric în raport cu aceste transformări. El e în schimb simetric în raport cu rotațiile discrete cu 90º (figura 6).

Teorema lui Noether leagă fiecare lege de conservare de o transformare de simetrie continuă. Ea a descoperit că legile care guvernează energia sunt invariante la schimbări sau „translații“ continue în *timp*. Cu alte cuvinte, relațiile matematice care descriu dinamica unui sistem fizic la un anumit timp t sunt exact aceleaşi după un interval de timp infinitezimal de scurt.

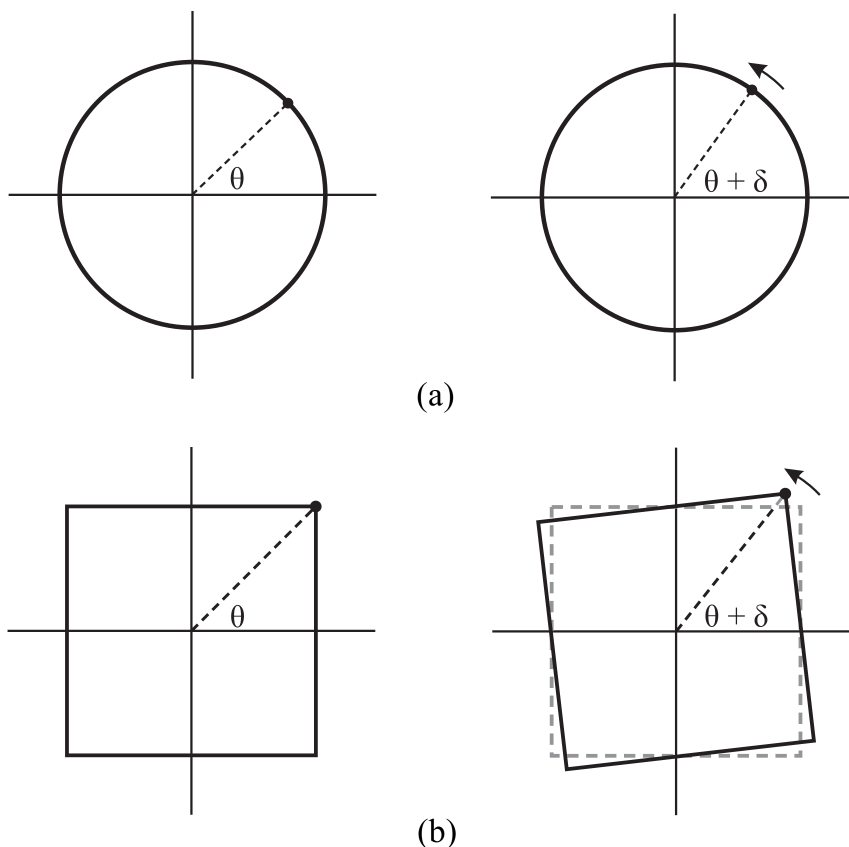


Figura 6. Transformările continue de simetrie implică schimbări mici, treptate, ale unei variabile continue, cum ar fi o distanță sau un unghi. (a) Când rotim un cerc cu un mic unghi (δ), cercul pare neschimbat (sau „invariant"), şi spunem că este simetric în raport cu aceste transformări. (b) Spre deosebire de cerc, un pătrat nu e simetric în acest sens. Pătratul este simetric însă în raport cu rotațiile *discrete* cu un unghi de 90º.

Rezultă de aici că aceste legi nu se modifică în timp, tocmai ce ne aşteptăm să se întâmple cu relațiile dintre mărimile fizice pe care vrem să le ridicăm la rangul de „legi" fundamentale. Aceste legi au fost, sunt şi vor fi aceleaşi ieri, azi şi mâine, ceea ce ne dă un sentiment de încredere. Dacă legile care descriu energia nu se schimbă în timp, atunci energia *trebuie* să se conserve.

Pentru impuls, Noether a descoperit că legile trebuie să fie invariante la *translații* continue în *spațiu*. Legile care guvernează

conservarea impulsului nu depind de localizarea în spațiu. Ele sunt aceleaşi aici, acolo şi oriunde. Pentru momentul cinetic, legile sunt invariante la transformările de simetrie rotaționale, ca în exemplul cercului, prezentat pe pagina alăturată. Ele sunt aceleaşi indiferent de *unghiul direcției* măsurat din centrul de rotație.

Raționamentul prin care Noether a ajuns la teorema ei sună cam aşa. În fizică există anumite mărimi care par să se conserve, după cum rezultă din observația atentă şi din experiment. După multe eforturi, fizicienii au dedus legile ce guvernează mărimile care se conservă. Aceste legi se constată că sunt invariante la anumite transformări de simetrie continue. O asemenea invarianță înseamnă că mărimile respective *trebuie* să se conserve.

Acest raționament poate fi inversat. Să presupunem că există o mărime care pare să se conserve, dar legile care îi guvernează comportamentul nu sunt încă pe deplin lămurite. Dacă mărimea fizică se conservă într-adevăr, atunci legile – oricare ar fi ele – trebuie să fie invariante la o anumită transformare continuă de simetrie. Dacă putem descoperi care e această simetrie, atunci suntem pe drumul cel bun pentru a identifica legile.

Inversând raționamentul lui Noether, găsim un mijloc de a evita teoretizările făcute prin încercări şi eşecuri. Fizicienilor li s-a dat o metodă de a identifica legi, care i-a ajutat să elimine o gamă largă de structuri matematice posibile. Găsirea simetriei care stă la baza mărimii fizice scurtează drumul către răspuns.

*

Exista într-adevăr o mărime fizică ce părea că se conservă riguros, dar pentru care legile potrivite trebuiau deduse. Aceasta era sarcina electrică.

Fenomenul electricității statice era cunoscut filozofilor din Grecia antică. Ei au descoperit că puteau genera sarcini electrice şi chiar scântei frecând cu o bucată de blană unele materiale cum este chihlimbarul. Studiul ştiințific al electricității are o lungă şi strălucită istorie, la care au contribuit mulți fizicieni,

dar cel care a sintetizat multitudinea de observaţii şi experimente într-o perspectivă unică şi coerentă asupra naturii sarcinii electrice a fost englezul Michael Faraday, care lucra la Institutul Regal din Londra. În urma unor experimente laborioase s-a ajuns la concluzia inevitabilă că sarcina electrică nu poate fi creată sau distrusă în nici o transformare fizică sau chimică. Sarcina se conservă.

Au fost găsite multe legi sau reguli care guvernează sarcina electrică şi legătura ei misterioasă cu magnetismul – legea lui Coulomb, legea lui Gauss, legea lui Ampère, regula lui Biot şi Savart, legea lui Faraday etc. La începutul anilor ’60 ai secolului XIX, fizicianul scoţian James Clerk Maxwell a făcut pentru electromagnetism ceea ce făcuse Newton pentru teoria mişcării planetare. El a ajuns la o sinteză teoretică îndrăzneaţă, care corespundea unificării experimentale a lui Faraday. Frumoasele ecuaţii ale lui Maxwell legau strâns între ele câmpurile electric şi magnetic generate de o sarcină electrică în mişcare.*

Ecuaţiile mai demonstrau că toate radiaţiile electromagnetice – inclusiv lumina – pot fi descrise ca o mişcare ondulatrie având o viteză ce poate fi calculată din două constante fizice cunoscute. Acestea sunt permitivitatea electrică a vidului, care măsoară capacitatea spaţiului vid de a transmite sau „permite“ un câmp electric generat de o sarcină electrică, şi permeabilitatea magnetică a vidului, o măsură a capacităţii acestuia de a dezvolta un câmp magnetic în jurul unei sarcini electrice în mişcare. Când Maxwell a combinat aceste constante în modul dictat de noua sa teorie electromagnetică, rezultatul pe care l-a

---

* E momentul să explicăm ce înţelegem aici prin „câmpuri“. Câmpul asociat cu o forţă, cum sunt gravitaţia sau electromagnetismul, are atât o mărime, cât şi o direcţie în fiecare punct al spaţiului din jurul obiectului care îl generează. Puteţi detecta acest câmp plasând în el un alt corp care simte forţa. Luaţi orice obiect (de preferinţă unul care nu se sparge) şi daţi-i drumul să cadă. Răspunsul obiectului este guvernat de mărimea şi direcţia câmpului gravitaţional din punctul în care l-aţi lăsat liber. Obiectul simte forţa şi cade pe pământ. (*N. a.*)

obținut pentru viteza „undelor electromagnetice“ a fost exact viteza luminii.

Dar ecuațiile lui Maxwell tratează *câmpurile* generate de sarcina electrică, nu sarcina însăşi. Aceste mărimi sunt strâns corelate, însă ecuațiile nu oferă în principiu o bază pentru a înțelege originea conservării sarcinii. În lumina teoremei lui Noether, căutarea legilor care guvernează sarcina electrică se reduce la căutarea transformării continue de simetrie subiacente față de care legile sunt invariante.

Misiunea căutării a fost preluată de matematicianul german Hermann Weyl.

Născut în 1885 în Elmshorn, un orăşel de lângă Hamburg, Weyl îşi luase doctoratul sub conducerea lui Hilbert, la Göttingen, în 1908. Obținuse apoi un post de profesor la Institutul Federal de Tehnologie (ETH) din Zürich, unde l-a întâlnit pe Albert Einstein şi a început să fie preocupat de problemele fizicii matematice.

În elaborarea teoriei relativității generale din 1915, Einstein eliminase orice noțiune de spațiu şi timp absolut. În schimb, susținea el, fizica trebuie să depindă doar de distanțele dintre puncte şi de curbura spațiului-timp în fiecare punct. Acesta este principiul *covarianței generale* al lui Einstein, iar teoria gravitației care rezultă este invariantă la schimbări arbitrare ale sistemului de coordinate. Cu alte cuvinte, deşi există legi fizice naturale, nu există nici un sistem de coordonate „natural“ al universului. Inventăm sisteme de coordonate pentru a ne ajuta să descriem fizica, dar legile ca atare nu trebuie să depindă (şi nu depind) de aceste alegeri arbitrare.

Există două moduri în care putem schimba sistemul de coordonate. Putem efectua o transformare *globală*, aplicată uniform în toate punctele din spațiu şi timp. Un exemplu de asemenea transformare de simetrie globală este o decalare uniformă a liniilor de latitudine şi longitudine folosite de cartografi pentru a reprezenta suprafața Pământului. Câtă vreme schimbarea e

uniformă şi aplicată coerent pe tot globul, capacitatea noastră de a naviga dintr-un loc în altul nu e influențată în nici un fel.

Dar schimbările pot fi făcute şi *local*, cu modificări diferite ale coordonatelor în puncte diferite din spațiu-timp. De exemplu, într-o anumită parte a spațiului putem alege să rotim axele sistemului nostru de coordonate cu un unghi mic, schimbând în acelaşi timp şi scala. Această schimbare nu produce nici o modificare în predicțiile relativității generale, cu condiția ca ea să se exprime prin măsurători ale diferențelor în poziție şi ale diferențelor în timp. Covarianța generală este deci un exemplu de invarianță la transformări de simetrie locale.

Weyl a reflectat îndelung şi temeinic asupra teoremei lui Noether şi s-a ocupat de teoria grupurilor de transformări de simetrie continue numite grupuri Lie, după matematicianul norvegian din secolul XIX Sophus Lie. În 1918, el a ajuns la concluzia că legile de conservare sunt legate de transformările de simetrie locale, cărora le-a dat numele generic de *simetrii de etalonare*, termen din păcate destul de obscur. Influențat de lucrările lui Einstein, el se gândea la simetrie în funcție de distanțele dintre puncte în spațiu-timp, ca în exemplul unui tren care se mişcă pe şine cu un ecartament fix.*

El a observat că, generalizând principiul covarianței generale la un principiu al invarianței la etalonare, a putut folosi teoria lui Einstein ca bază pentru deducerea ecuațiilor lui Maxwell pentru electromagnetism. Ce descoperise el părea a fi o teorie care putea unifica cele două forțe cunoscute atunci în ştiință – electromagnetismul şi gravitația. Invarianța identificată cu legile de conservare putea fi pusă în legătură cu schimbările arbitrare în „etalonarea“ câmpurilor implicate. În acest fel, Weyl spera să demonstreze conservarea energiei, a impulsului şi a momentului cinetic, precum *şi* a sarcinii electrice.

---

* Termenul în engleză pentru ecartament este *gauge*, care înseamnă şi etalon. (*N. t.*)

Weyl a atribuit inițial invarianța la etalonare spațiului însuşi. Dar, după cum a observat imediat Einstein, aceasta însemna că lungimile măsurate ale barelor şi indicațiile ceasornicelor ar ajunge să depindă de istoria lor recentă. Un ceasornic mutat de colo-colo într-o cameră n-ar mai putea indica ora exactă. Einstein i-a scris lui Weyl, obiectând: „Lăsând deoparte acordul cu realitatea, [teoria dumneavoastră] este în orice caz o măreață înfăptuire a intelectului.“[2]

Weyl a fost tulburat de această critică, dar a acceptat că trebuia ținut cont de intuiția lui Einstein în asemenea chestiuni. Weyl şi-a abandonat teoria.

*

Fizicianul austriac Erwin Schrödinger a primit un post la Universitatea din Zürich trei ani mai târziu, în 1921. După doar câteva luni, a fost diagnosticat ca suspect de tuberculoză pulmonară. I s-a prescris o perioadă de repaus complet. Împreună cu soția sa, Anny, s-a retras la o vilă din stațiunea Arosa din Alpi, în apropiere de eleganta stațiune de schi Davos, unde a stat nouă luni.

În timp ce Anny îl îngrijea ca să-şi recapete sănătatea, Schrödinger se gândea la semnificația simetriei de etalonare a lui Weyl şi, îndeosebi, la un „factor de etalonare“ periodic ce apărea în teoria lui Weyl. În 1913, fizicianul danez Niels Bohr publicase câteva detalii ale unei teorii a structurii atomice, în care electronii erau constrânşi să se rotească în jurul nucleului la energii fixe caracterizate prin „numerele lor cuantice“. Aceste numere întregi guvernau energiile orbitelor, care creşteau în şir liniar (1, 2, 3…) de la orbita cea mai apropiată de nucleu la cea mai îndepărtată. La acea vreme, originea lor era un mister total.

Lui Schrödinger i-a venit brusc ideea că s-ar putea să existe o legătură între periodicitatea impusă de factorul de etalonare al lui Weyl şi periodicitatea prezentă în orbitele atomice cuantificate ale lui Bohr. El a examinat câteva forme posibile pentru factorul de etalonare, inclusiv una care conținea un număr

complex, format prin înmulțirea unui număr real cu numărul „imaginar“ *i*, rădăcina pătrată a lui –1.* Într-un articol publicat în 1922, el a sugerat că această legătură are o semnificație fizică profundă. Dar era doar o intuiție vagă. Semnificația reală a legăturii i-a devenit limpede abia atunci când a studiat teza de doctorat din 1924 a fizicianului francez Louis de Broglie.

De Broglie sugerase că, la fel cum undele electromagnetice par să se comporte ca nişte particule**, poate că şi particulele precum electronii ar putea să se comporte uneori ca nişte unde. Orice ar fi fost ele, aceste „unde de materie“ nu puteau fi asemănătoare în vreun fel fenomenelor ondulatorii cunoscute, cum erau undele sonore sau undele formate pe suprafața apei. De Broglie a tras concluzia că o undă de materie reprezintă o distribuție spațială a *fazei*, adică este o „*undă de fază*“[3]***.

Schrödinger a început să se întrebe: oare cum ar arăta electronul dacă ar fi descris de o undă? În 1925, de Crăciun, el s-a mai retras încă o dată la Arosa. Relația cu soția lui se răcise, aşa că a invitat o mai veche prietenă din Viena să-l însoțească. Şi-a luat cu el şi însemnările pe marginea tezei lui de Broglie. Când

---

* Acest număr e „imaginar“ doar în sensul că nu este posibil să calculăm rădăcina pătrată a lui –1. Când este ridicat la pătrat, orice număr pozitiv sau negativ va da mereu un rezultat pozitiv. Dar, chiar dacă rădăcina pătrată din –1 nu există, acest fapt nu i-a împiedicat pe matematicieni s-o folosească. Astfel, rădăcina pătrată a oricărui număr negativ poate fi exprimată în funcție de *i*. De exemplu, rădăcina pătrată din –25 este numărul 5*i*, care se numeşte număr complex sau imaginar. (*N. a.*)

** Acestea fuseseră numite de Einstein în 1905 „cuante de lumină“. Astăzi le numim fotoni. (*N. a.*)

*** Un exemplu familiar de undă de fază este oferit de o valul „mexican“ care se propagă de-a lungul unui stadion. Valul e creat de mişcările spectatorilor individuali atunci când aceştia îşi schimbă poziția de la stând în picioare cu brațele ridicate („creasta“ undei) la stând aşezați pe scaun („valea“ undei). Unda de fază este rezultatul mişcărilor coordonate ale spectatorilor şi se poate propaga de-a lungul stadionului mult mai repede decât o pot face spectatorii individuali care o întrețin. (*N. a.*)

s-a întors, pe 8 ianuarie 1926, descoperise *mecanica ondulatorie*, o teorie care descria electronul ca pe o undă, iar orbitele teoriei atomice a lui Bohr prin „funcțiile de undă“ ale electronului.

Acum putea face legătura. Un exemplu de grup Lie este grupul de simetrie U(1), cunoscut ca grupul unitar al transformărilor care depind de o variabilă complexă. Acesta implică transformări de simetrie care sunt, în multe privințe, pe deplin analoage celor implicând o rotație continuă pe un cerc. Dar, în timp ce un cerc este desenat într-un plan bidimensional format din dimensiuni reale, transformările grupului de simetrie U(1) implică rotații într-un plan bidimensional *complex.* Acesta e format din două dimensiuni „reale“, una din ele fiind înmulțită cu *i*.

Putem reprezenta acest grup de simetrie şi în funcție de transformările continue ale *unghiului de fază* al unei unde sinusoidale (vezi figura 7). Unghiuri diferite corespund unor amplitudini diferite ale undei în ciclul ei de la maxim la minim. Simetria de etalonare a lui Weyl se păstrează dacă modificările în faza funcției de undă ale electronului sunt asociate cu o modificare adecvată a câmpului electromagnetic care îl însoțeşte. Conservarea sarcinii electrice poate fi legată de simetria de fază globală a funcției de undă a electronului.

Legătura dintre mecanica ondulatorie şi teoria de etalonare a lui Weyl a fost pusă în evidență în mod explicit în 1927 de tânărul teoretician german Fritz London şi de fizicianul sovietic Vladimir Fock. Weyl şi-a reformulat şi extins teoria în contextul mecanicii cuantice în 1929.

*

„Dualismul“ undă–particulă al lui de Broglie implica faptul că electronul trebuia privit atât ca particulă, cât şi ca undă. Dar cum se putea aşa ceva? Particulele sunt mici fragmente de materie localizate, undele sunt perturbații nelocalizate într-un mediu (gândiți-vă la undele de pe suprafața apei unui lac, produse de aruncarea unei pietre). Particulele sunt „aici“, undele sunt „pretutindeni“.

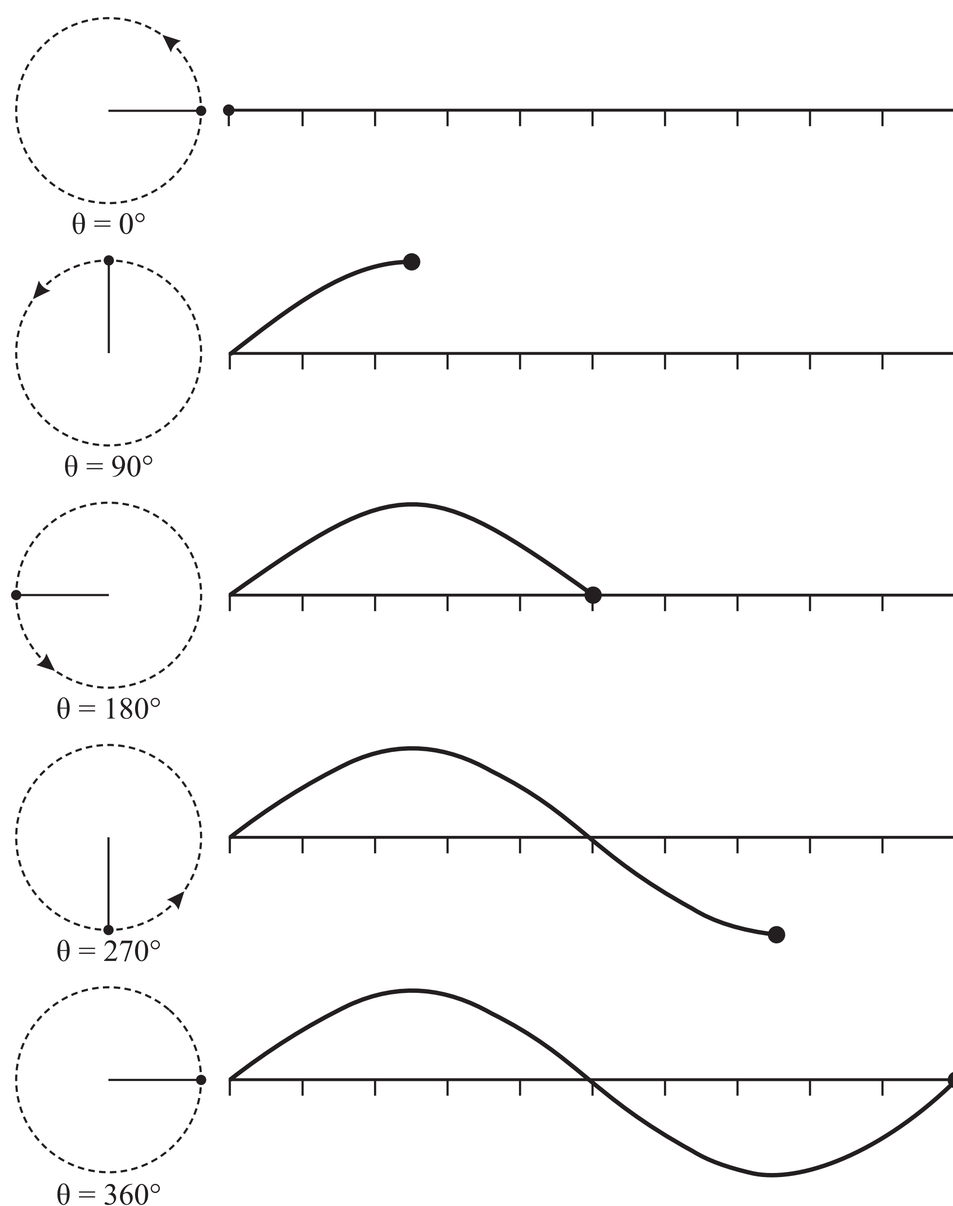


Figura 7. Grupul de simetrie U(1) este grupul unitar al transformărilor unei variabile complexe. Într-un plan complex format de o axă reală şi o axă imaginară, putem localiza orice număr complex pe circumferința cercului format prin rotirea dreptei duse din origine până la punct prin unghiul continuu, θ, pe care îl face dreapta cu axa reală. Există o legătură strânsă între această simetrie continuă şi mişcarea ondulatorie simplă, în care unghiul θ este un unghi de fază.

Una dintre consecințele fizice ale dualismului undă–particulă este că nu putem măsura simultan cu precizie poziția şi impulsul (adică viteza şi direcția) unei particule cuantice. Gândiți-vă puțin. Dacă putem măsura precis poziția unei particule-undă, înseamnă că ea e localizată în spațiu şi timp. Ea este „aici“. Pentru o undă acest lucru e posibil doar dacă ea este formată prin combinarea unui mare număr de unde de frecvențe diferite, care se adună pentru a produce o undă de amplitudine mare într-o zonă a spațiului şi mică în orice altă parte. Aceasta ne dă poziția, dar cu prețul unei incertitudini totale în ce priveşte frecvența undei, deoarece ea trebuie să fie compusă din numeroase unde cu o mulțime de frecvențe foarte diferite.

Dar, în ipoteza lui de Broglie, inversul frecvenței undei este legat direct de impulsul particulei.* Incertitudinea în frecvență înseamnă deci o incertitudine în impuls.

Reciproca este şi ea adevărată. Dacă vrem să ştim precis frecvența undei, şi deci impulsul particulei, atunci trebuie să ne limităm la o singură undă cu o frecvență unică. Dar atunci n-o mai putem localiza. Particula-undă rămâne răspândită în tot spațiul şi nu mai putem măsura o poziție precisă.

Această incertitudine în poziție şi impuls stă la baza celebrului principiu de incertitudine al fizicianului german Werner Heisenberg, descoperit în 1927. El este o consecință directă a dualismului undă–particulă în comportamentul obiectelor cuantice elementare.

*

Weyl s-a întors la Göttingen în 1930, preluând postul de profesor, rămas vacant prin pensionarea lui Hilbert. El a întâlnit-o pe Noether, care rămăsese la Göttingen, cu excepția unei scurte

---

* Relația lui de Broglie se scrie: $\lambda = h/p$, unde λ este lungimea de undă (legată de inversul frecvenței), h este constanta lui Planck, iar p este impulsul. Asta înseamnă că $p = h\nu/c$, unde c este viteza luminii, iar ν frecvența. (*N. a.*)

vizite de studiu la Universitatea de Stat din Moscova, în iarna 1928–1929.

În ianuarie 1933, Adolf Hitler a devenit cancelar al Germaniei. După câteva luni, guvernul național-socialist al lui Hitler a adoptat legea pentru reglementarea funcțiilor în administrație, prima dintre cele patru sute de asemenea legi şi decrete care au urmat. Ea a dat naziştilor baza legală pentru a le interzice evreilor să ocupe posturi în serviciul public, inclusiv poziții academice în universitățile germane.

Soția lui Weyl era evreică, iar el a părăsit Germania pentru a i se alătura lui Einstein la Institutul de Studii Avansate de la Princeton, New Jersey. Noeher era evreică şi şi-a pierdut postul de la Göttingen. Ea nu a fost promovată niciodată la statutul de profesor plin. A plecat la Bryn Mawr College, un colegiu de ştiințe umaniste din Pennsylvania. A murit după doi ani, la vârsta de 53 de ani.

Într-un necrolog apărut în *New York Times* la scurt timp după moartea ei, Einstein scria[4]:

> După părerea celor mai competenți matematicieni în viață, domnişoara Noether a fost geniul matematic creator cel mai important apărut de când femeile au avut acces la învățământul superior. În domeniul algebrei, de care cei mai talentați matematicieni s-au ocupat timp de secole, ea a descoperit metode ce s-au dovedit de o importanță enormă pentru dezvoltarea generației actuale de matematicieni mai tineri. Matematica pură este, în felul ei, poezia ideilor logice. Se caută cele mai generale tipuri de operații care să unească într-o formă simplă, logică şi unitară cel mai mare ansamblu posibil de relații formale. În acest efort îndreptat către frumusețea logică, se constată că formulele abstracte sunt necesare pentru o pătrundere mai adâncă în legile naturii.

CAPITOLUL 2

Asta nu-i o scuză!

În care Chen Ning Yang şi Robert Mills încearcă să elaboreze o teorie cuantică de câmp pentru forțele nucleare tari şi îl necăjesc pe Wolfgang Pauli.

Când Dirac a reuşit să unească în 1927 teoria cuantică cu teoria relativității restrânse a lui Einstein, rezultatul a fost spinul electronului şi antimateria. Ecuația lui Dirac a fost privită pe bună dreptate ca o minune absolută, dar lumea şi-a dat imediat seama că ea nu putea fi sfârşitul poveştii.

Fizicienii au început să recunoască faptul că aveau nevoie de o teorie relativistă matură a electrodinamicii cuantice (QED). Aceasta trebuia, în esență, să fie o versiune cuantică a ecuațiilor lui Maxwell, care să fie conformă cu teoria relativității restrânse a lui Einstein. O asemenea teorie trebuia să includă în mod necesar o versiune cuantică a câmpului electromagnetic.

Unii fizicieni considerau câmpurile „mai fundamentale" decât particulele. Se credea că o descriere corectă bazată pe câmpurile cuantice ar trebui să producă particule precum „cuantele" câmpurilor înseşi, care să transmită forța de la o particulă în interacție la alta. Părea clar că fotonul era particula de câmp a câmpului electromagnetic cuantic, creată şi distrusă atunci când particulele încărcate electric interacționează.

Fizicianul german Werner Heisenberg şi cel austriac Wolfgang Pauli au elaborat în 1929 o versiune a unei astfel de teorii. Dar exista o mare problemă. Fizicienii au constatat că nu puteau rezolva exact ecuațiile de câmp. Cu alte cuvinte, nu era posibil să se scrie o soluție a ecuațiilor de câmp care să ia forma unei

expresii matematice unice, de sine stătătoare, aplicabilă în toate situațiile.

Heisenberg şi Pauli au trebuit să recurgă la o abordare alternativă pentru a rezolva ecuațiile de câmp, bazată pe aşa-numita dezvoltare perturbativă. În această abordare, ecuația e scrisă ca suma unei serii potențial infinite de termeni: $x^0 + x^1 + x^2 + x^3 + \cdots$. Seria începe cu o expresie „de ordin zero“ (sau de interacție zero), care poate fi rezolvată exact. La aceasta se adaugă termeni suplimentari (sau de perturbație), care reprezintă corecții de ordinul întâi (x^1), de ordinul doi (x^2), de ordinul trei (x^3) etc. În principiu, fiecare termen din dezvoltare constituie o corecție din ce în ce mai mică la rezultatul de ordin zero, aducând treptat calculul din ce în ce mai aproape de rezultatul exact. Precizia rezultatului final depinde astfel doar de numărul de termeni de perturbație incluşi în calcul.

Dar, în loc să obțină corecții din ce în ce mai mici, ei au observat că unii termeni din dezvoltarea perturbativă creşteau rapid către infinit. Când metoda a fost aplicată în cazul teoriei cuantice de câmp a electronului, s-a văzut că aceşti termeni rezultă din „energia proprie“ a electronului, o consecință a interacției electronului cu propriul său câmp electromagnetic.

Nu exista nici o ieşire evidentă din impas.

*

Chestiunea a rămas în suspensie. James Chadwick a descoperit neutronul în 1932. În anii care au urmat acestei descoperiri, fizicianul italian Enrico Fermi a folosit neutroni de energie înaltă pentru a bombarda atomii diferitelor elemente chimice, în căutarea unor noi fenomene fizice interesante. Contrariați de unele dintre rezultatele lui Fermi, chimiştii germani Otto Hahn şi Fritz Strassman au studiat produşii rezultați din bombardarea cu neutroni a atomilor de uraniu. În ajunul Crăciunului din 1938, rezultatele lor, încă şi mai ciudate, au fost discutate de vechea colaboratoare a lui Hahn, Lise Meitner, şi de nepotul

ei, fizicianul Otto Frisch, amândoi exilați deja din Germania nazistă. Discuțiile lor însuflețite au dus la descoperirea fisiunii nucleare.

A fost o descoperire de rău augur, anunțată în ianuarie 1939, cu doar nouă luni înainte de începerea celui de-al Doilea Război Mondial. Transformați din nişte „savanți cu capul în nori“ în cele mai importante resurse militare ale statelor-națiuni, fizicienii lucrau acum pentru a face din descoperirea fisiunii nucleare cea mai cumplită armă de război.

În 1947, când în sfârşit a venit vremea ca fizicienii să-şi îndrepte din nou atenția asupra dificultăților de care era copleşită electrodinamica cuantică, s-a constatat că fizica teoretică stagnase de aproape două decenii.

*

A urmat însă rapid o altă explozie uriaşă de creativitate. În iunie 1947, un grup de fizicieni americani de frunte s-a reunit pentru o conferință mică, cu participare doar pe bază de invitație, la Ram's Head Inn, un mic hotel construit din lemn pe Shelter Island, în extremitatea estică a lui Long Island, în statul New York.

Era un grup ilustru. Printre participanți se aflau J. Robert Oppenheimer, „părintele“ bombei atomice, Hans Bethe, care condusese Departamentul de Fizică Teoretică de la Los Alamos, Victor Weisskopf, Isidor Rabi, Edward Teller, John Van Vleck, John von Neumann, Willis Lamb şi Hendrik Kramers. Noua generație de fizicieni era reprezentată de John Wheeler, Abraham Pais, Richard Feynman, Julian Schwinger şi Robert Serber şi David Bohm, foşti studenți ai lui Oppenheimer. Einstein fusese invitat, dar n-a putut veni din motive de sănătate.

Fizicienii au aflat despre câteva noi rezultate experimentale cam îngrijorătoare. Se constatase că una dintre stările cuantice ale hidrogenului atomic era deplasată puțin în energie față de alta, fenomen cunoscut drept *deplasare Lamb*, după numele

celui care îl descoperise, Willis Lamb. Teoria lui Dirac prezicea că ambele stări trebuiau să aibă exact aceeaşi energie.

Şi asta nu era totul. Rabi a anunțat că o nouă măsurătoare a factorului *g* al electronului – o constantă fizică ce reflectă tăria interacției unui electron cu un câmp magnetic – dădea valoarea de 2,00244. Teoria lui Dirac prezicea un factor *g* egal exact cu 2.

Acestea erau rezultate ce nu puteau fi prezise fără o teorie completă a electrodinamicii cuantice. Se părea că, deşi teoria era afectată de dificultăți ținând de structura ei matematică, natura însăşi nu avea probleme cu mărimile infinite. Fizicienii trebuiau să găsească cumva o cale de ieşire din impas.

Discuția s-a prelungit până noaptea târziu. Fizicienii s-au împărțit în grupuri de câte doi sau trei, coridoarele răsunând de ecoul disputelor, semn că îşi redobândeau pasiunea pentru fizică. Schwinger avea să remarce ulterior: „Era pentru prima dată când oameni care ținuseră închisă în ei toată această fizică timp de peste cinci ani puteau vorbi între ei fără ca cineva să apară în spatele lor şi să zică: «Ai permisiunea să spui asta?»“[1]

A apărut apoi un licăr de speranță. Fizicianul olandez Kramers a prezentat un nou mod de a privi masa electronului în câmp electromagnetic. El a propus ca energia proprie a electronului să fie tratată ca o contribuție suplimentară la masa lui.

După conferință, Bethe s-a întors la New York şi a luat un tren către Schenectady, unde lucra pe post de consultant cu jumătate de normă la General Electric. În tren, a început să se uite din nou peste ecuațiile electrodinamicii cuantice. Teoriile existente preziceau o deplasare Lamb infinită, drept consecință a interacției electronului cu el însuşi. Bethe a urmat acum propunerea lui Kramers şi a identificat termenul infinit din dezvoltarea perturbativă ca pe efectul unei mase electromagnetice. Cum ar putea scăpa de el?

Bethe s-a gândit că ar putea să-l scadă pur şi simplu. Dezvoltarea perturbativă pentru un electron legat într-un atom de

hidrogen include un termen de masă infinit. Dar şi dezvoltarea din cazul unui electron liber include acelaşi termen de masă infinit. De ce nu am scădea pur şi simplu o serie perturbativă din cealaltă, eliminând astfel termenii infiniţi? Se părea că, scăzând infinit din infinit, se obţine un rezultat fără sens*, dar Bethe a găsit acum că, într-o versiune simplă, nerelativistă a electrodinamicii cuantice, această scădere producea un rezultat care, deşi mai avea încă probleme, se comporta într-un mod mult mai temperat. El a estimat că, într-o teorie a electrodinamicii cuantice complet conformă cu teoria relativităţii restrânse a lui Einstein, acest procedeu de „renormare“ ar elimina complet problema şi ar da un rezultat realist din punct de vedere fizic.

Deoarece procedeul îmblânzise parţial comportamentul ecuaţiilor, el a reuşit să obţină o estimare aproximativă pentru mărimea prezisă a deplasării Lamb. Nesigur în privinţa unui factor 2 pe care îl introdusese în calcule, în drum către laboratoarele de cercetare de la General Electric el a făcut o scurtă vizită la bibliotecă şi s-a asigurat că factorul era corect. Obţinuse o predicţie pentru deplasarea Lamb care era doar cu patru procente mai mare decât valoarea experimentală pe care Lamb o anunţase la conferinţa din Shelter Island.

Era clar că se afla pe calea cea bună.

*

A mai trecut ceva timp până să fie elaborată o teorie relativistă definitivă a electrodinamicii cuantice, care să poată fi renormată în acest mod. Schwinger a prezentat o versiune într-o

---

* Nu sunteţi siguri? Încercaţi următoarea operaţie. Suma seriei infinite a numerelor întregi, 1 + 2 + 3 + 4 + ···, este în mod evident infinită. La fel este şi suma seriei infinite a numerele întregi pare, 2 + 4 + 6 + 8+ ···. Să scădem infinit din infinit, scăzând seria numerelor pare din seria numerelor întregi. Ce obţinem este suma numerelor impare, 1 + 3 + 5 + 7+ ···, care este şi ea infinită, dar e un rezultat care are totuşi „sens“. Acest exemplu e luat din Gribbin, p. 417. (*N. a.*)

lecție-maraton de cinci ore, ținută la o conferință ulterioară, care a avut loc în martie 1948 la Pocono Manor Inn, în munții Pocono, lângă Scranton, Pennsylvania. Matematica sa era în cea mai mare parte impenetrabilă. Doar Fermi şi Bethe, se pare, i-au urmărit până la capăt demonstrația.

Rivalul lui Schwinger din New York, Feynman, elaborase între timp o metodă foarte diferită, mult mai intuitivă, pentru a descrie corecțiile perturbative şi a ține evidența lor în electrodinamica cuantică. Nici unul nu înțelegea metoda celuilalt, dar, când şi-au comparat notițele la sfârşitul prezentării lui Schwinger, au constatat că rezultatele lor erau identice. „Atunci am ştiut că nu sunt nebun“, a spus Feynman.[2]

Acesta părea să fie finalul poveştii, dar Oppenheimer a aflat de încă o abordare de succes a electrodinamicii cuantice dintr-o scrisoare primită de la fizicianul japonez Sin-Itiro Tomonaga, imediat după ce s-a întors de la conferința din Pocono. Tomonaga folosise metode similare celor ale lui Schwinger, dar matematica lui părea mult mai simplă. Situația era derutantă. Aceste abordări foarte diferite ale electrodinamicii cuantice relativiste produceau toate rezultate asemănătoare, dar nimeni nu înțelegea bine de ce.

Un tânăr fizician englez pe nume Freeman Dyson a acceptat provocarea. Pe 2 septembrie 1948, el a luat un autobuz din Berkeley, lângă San Francisco, California, pentru a ajunge pe Coasta de Est. „În a treia zi a călătoriei s-a întâmplat un lucru remarcabil“, le scria el părinților după câteva săptămâni. „Căzut într-o stare de apatie după 48 de ore de mers cu autobuzul, am început să mă gândesc foarte intens la fizică, şi în special la teoriile rivale ale radiației propuse de Schwinger şi Feynman. Treptat, gândurile mele au devenit mai coerente şi, înainte de a şti unde mă găseam, rezolvasem problema pe care o avusesem în subconştient tot timpul în acest an, şi anume izbutisem să demonstrez echivalența celor două teorii.“[3]

Rezultatul a fost o teorie complet relativistă a electrodinamicii cuantice, care prezice rezultatele experimentelor la

niveluri uimitoare de precizie şi corectitudine. Teoria prezice pentru factorul *g* al electronului valoarea 2,00231930476. Valoarea experimentală comparabilă este 2,00231930482.* „Ca să vă faceți o idee despre precizia acestor numere“, avea să scrie Feynman mai târziu, „gândiți-vă la următorul exemplu: dacă ar fi să măsurați cu aceeaşi precizie distanța dintre Los Angeles şi New York, eroarea ar fi cât grosimea unui fir de păr.“[4]

*

Succesul electrodinamicii cuantice a stabilit câteva precedente importante. Se părea acum că modul corect de a descrie o particulă fundamentală şi interacțiile ei este o teorie cuantică de câmp în care forța implicată e transmisă de particulele câmpului. Ca şi teoria electromagnetică a lui Maxwell, electrodinamica cuantică este o teorie de etalonare U(1), în care simetria locală de fază U(1) a funcției de undă a electronului este legată de conservarea sarcinii electrice.

Atenția s-a îndreptat acum către o teorie cuantică de câmp a forței tari dintre protonii şi neutronii din interiorul nucleului. Dar aici apărea o altă problemă. Legătura dintre conservarea sarcinii electrice şi electromagnetism – clasic sau cuantic – era evidentă intuitiv. Dacă urma să fie descoperită o teorie cuantică de câmp a forței tari, era mai întâi nevoie să se înțeleagă ce anume se conservă în interacțiile guvernate de forța tare şi cu ce transformare continuă de simetrie este ea legată.

Fizicianul chinez Chen Ning Yang credea că mărimea conservată în interacțiile nucleare implicând forța tare este *izospinul*.

Yang s-a născut în 1932 la Hefei, capitala provinciei Anhui din estul Chinei. A studiat în Kunming, la Universitatea Națională Asociată din Sud-vest, formată din Universitățile din

---

* Aceste numere sunt supuse unei rafinări continue, atât experimentale, cât şi teoretice. Valorile citate aici sunt luate din G.D. Coughlan şi J.E. Dodd, *The Ideas of Particle Physics: An Introduction for Scientists,* Cambridge University Press, 1991, pag. 14. (*N. a.*)

Tsinghua, Beijing şi Nankai, după invazia forţelor japoneze din 1937. A absolvit în 1942 şi a obţinut o diplomă de master după doi ani. În 1946, înarmat cu o bursă cunoscută sub numele de „indemnizaţia boxerilor“*, a ajuns la Universitatea din Chicago.

La Chicago, Yang a studiat fizica nucleară sub îndrumarea lui Edward Teller. Inspirat de autobiografia inventatorului şi omului politic american Benjamin Franklin, el şi-a luat şi prenumele de „Franklin“ sau, mai simplu, „Frank“. Şi-a susţinut doctoratul în 1948 şi a lucrat încă un an ca asistent al lui Fermi. În 1949 s-a mutat la Institutul de Studii Avansate de la Princeton.

Acolo a început Yang să se gândească la modul în care ar putea aplica teorema lui Noether pentru a construi o teorie cuantică de câmp a forţelor tari.

Conceptul de izospin, sau spin izotopic, s-a născut din faptul simplu că masele protonului şi neutronului sunt foarte apropiate.** Când a fost descoperit neutronul, în 1932, a fost natural să se presupună că este o particulă compusă, alcătuită dintr-un proton şi un electron. Se ştia că dezintegrarea radioactivă beta implica emisia unui electron de mare viteză direct din nucleu, un neutron transformându-se într-un proton în acest proces. De aici părea să rezulte că în radioactivitatea beta unul din neutronii compuşi îşi ejecta cumva electronul „lipit de el“.

La puţin timp după descoperirea neutronului, Heisenberg a folosit ideea de neutron ca „proton plus neutron“ pentru a

---

* Aceasta era o bursă administrată de Statele Unite cu fonduri plătite de chinezi, în compensaţie pentru „revolta boxerilor“ de la sfârşitul secolului XIX. (*N. a.*)

** Masele particulelor atomice se exprimă în mod obişnuit ca energii, de care sunt legate prin ecuaţia lui Einstein $m = E/c^2$. Masa protonului este de 938,3 MeV/c^2, unde MeV înseamnă un mega (un milion de) electronvolţi. Masa neutronului este de 939,6 MeV/c^2. Factorul c^2 este adesea omis (el fiind implicit), iar masele sunt date simplu ca 938,3 şi, respectiv, 939,6 MeV. Un electronvolt este cantitatea de energie pe care o câştigă un electron încărcat negativ atunci când este accelerat într-un câmp electric la o diferenţă de potenţial de un volt. (*N. a.*)

elabora o primă teorie a interacțiilor proton–neutron din nucleu. Era un model care se baza din plin pe teoriile legăturii chimice.

Heisenberg a presupus că protonul şi neutronul sunt legați împreună în nucleu prin schimbul unul electron între ei, în cursul procesului protonul transformându-se în neutron, iar neutronul transformându-se în proton. Interacția dintre doi neutroni ar implica schimbul a doi electroni, câte unul în fiecare „sens".

Acest schimb sugerează că, în nucleu, protonii şi neutronii tind să-şi piardă identitatea, trecând rapid dintr-o formă în alta, ceea ce era în acord cu ideea lui Heisenberg că protonul şi neutronul sunt pur şi simplu două stări ale aceleiaşi particule şi că se deosebesc între ele prin proprietățile diferite ale acelor stări. Stările diferite posedă, desigur, sarcini electrice diferite, una e pozitivă, cealaltă neutră. Dar pentru a face ca această teorie să funcționeze, Heisenberg a trebuit să mai introducă şi o proprietate suplimentară analoagă spinului electronului.

El a introdus astfel ideea de izospin (care nu trebuie confundat cu spinul electronului), conform căreia protonului i se atribuie (în mod arbitrar) o orientare a spinului în sus, iar neutronului o orientare a spinului în jos. Acestea sunt orientări într-un „spațiu al izospinului" care are doar două dimensiuni, în sus şi în jos. Transformarea unui neutron într-un proton este atunci echivalentă cu „rotația" spinului neutronului în spațiul izospinului, de la spinul în jos la spinul în sus.

Toate astea sună foarte misterios, dar în multe privințe izospinul este asemănător sarcinii electrice. Faptul că suntem familiarizați cu electricitatea nu trebuie să ne facă să uităm că şi ea este o proprietate care ia „valori" (în loc de „orientări") într-un „spațiu al sarcinii" abstract cu două dimensiuni – una pozitivă şi alta negativă.

Deşi era o simplă analogie, teoria lui Heisenberg reprezenta deja o generalizare. Intensitățile legăturilor chimice formate prin schimbul electronilor sunt mult mai mici decât intensitatea forței care leagă protonii şi neutronii în nucleu. Dar Heisenberg

a reuşit să folosească teoria pentru a aplica mecanica cuantică nerelativistă nucleului însuşi. Într-o serie de lucrări publicate în 1932, el a explicat multe observații din fizica nucleară, de pildă stabilitățile relative ale izotopilor.

Neajunsurile teoriei au ieşit la iveală în experimente efectuate câțiva ani mai târziu. Deoarece protonul nu avea un electron „lipit de el", modelul lui Heisenberg de schimb al electronilor nu permitea nici un tip de interacție între protoni. Dar experimentele au arătat că intensitatea interacțiilor dintre protoni este comparabilă cu cea dintre protoni şi neutroni.

În ciuda neajunsurilor teoriei, modelul schimbului de electroni al lui Heisenberg avea cel puțin un grăunte de adevăr. Schimbul electronilor a fost abandonat, dar conceptul de izospin a rămas. În raport cu forța tare, protonul şi neutronul sunt în esență două stări ale aceleiaşi particule, ca şi cele două orientări ale spinului electronului. Singura diferență dintre ele este izospinul lor.

*

Izospinii individuali ai protonilor şi neutronilor se pot aduna pentru a da un izospin total, concept introdus de fizicianul Eugene Wigner în 1937. Literatura privind reacțiile nucleare părea să susțină ideea că izospinul total se conservă, exact la fel cum sarcina electrică se conservă în transformările fizice şi chimice. Yang a identificat apoi izospinul cu o simetrie de etalonare locală, la fel ca simetria de fază a funcției de undă a electronului în electrodinamica cuantică, şi a început să caute o teorie cuantică de câmp care s-o conserve.

El s-a împotmolit rapid, dar a început să fie obsedat de problemă. „Uneori o obsesie se dovedeşte până la urmă a fi ceva bun", avea să remarce el mai târziu.[5]

În toamna lui 1953 şi-a luat o scurtă învoire de la Institutul de Studii Avansate şi a făcut o vizită la Laboratorul Național Brookhaven din Long Island, New York. Acolo s-a întâmplat

să stea în acelaşi birou cu un tânăr fizician american pe nume Robert Mills.

Mills a fost captivat de obsesia lui Yang, şi împreună au lucrat la o teorie cuantică de câmp a forței nucleare tari. „N-a existat nici un alt imbold direct“, avea să explice Mills câțiva ani mai târziu. „Amândoi ne puneam doar întrebarea: «Iată ceva ce a funcționat o dată. De ce n-ar funcționa din nou?»“[6]

În electrodinamica cuantică, modificările în faza funcției de undă a electronului în spațiu şi timp sunt compensate de modificări corespunzătoare ale câmpului electromagnetic. Câmpul „reacționează“ astfel încât simetria de fază se păstrează. Dar o nouă teorie cuantică de câmp a forței tari trebuia să țină cont de faptul că acum erau două particule implicate. Dacă simetria de izospin se conservă, înseamnă că forța tare nu vede nici o diferență între proton şi neutron. Dacă se schimbă izospinul, de exemplu prin „rotația“ unui neutron care devine proton, e necesar să existe un câmp care să exercite o „reacțiune“ şi să restabilească astfel simetria. Yang şi Mills au introdus deci un nou câmp, numit de ei câmpul „B“, care urma să facă exact acest lucru.

Grupul simplu de simetrie U(1) este insuficient pentru acest tip de complexitate, de aceea Yang şi Mills au trecut la grupul SU(2), grupul unitar special al transformărilor pentru două variabile complexe. E nevoie de un grup de simetrie mai mare pur şi simplu pentru că există acum două obiecte care se pot transforma unul în altul.

Teoria avea nevoie şi de trei noi particule ale câmpului, care să transmită forța tare între protonii şi neutronii din interiorul nucleului, aşa cum face fotonul în electrodinamica cuantică. Două dintre cele trei particule de câmp trebuiau să aibă sarcină electrică, fiind răspunzătoare pentru schimbările sarcinii care rezultă din interacțiile proton–neutron şi neutron–proton. Yang şi Mills au numit aceste particule B^+ şi B^-. Cea de-a treia particulă era neutră, precum fotonul, şi a fost introdusă pentru a

descrie interacţiile proton–proton şi neutron–neutron în care sarcina nu se schimbă.

Până la sfârşitul verii, ei găsiseră o soluție. Dar era o soluție care ridica o mulțime de alte probleme.

De pildă, metodele de renormare care fuseseră folosite cu atâta succes în electrodinamica cuantică nu se puteau aplica teoriei de câmp pe care o concepuseră Yang şi Mills. Şi mai rău încă, termenul de ordinul zero din dezvoltarea perturbativă indica faptul că particulele trebuie să aibă masă nulă, exact la fel ca fotonul. Dar aceasta era o contradicție. Heisenberg şi fizicianul japonez Hideki Yukawa sugeraseră în 1935 că particulele care intermediază forțe de rază scurtă de acțiune, cum e forța tare, trebuie să fie „grele", adică trebuie să fie particule mari, masive. O particulă de câmp de masă nulă pentru forța tare nu avea nici un sens.

*

Yang s-a întors la Princeton. Pe 23 februarie 1954 a prezentat un seminar despre cercetările pe care le făcuse împreună cu Mills. Oppenheimer se afla în sală, ca şi Pauli, care se mutase la Universitatea Princeton în 1940.

Se pare că Pauli explorase cu ceva timp în urmă aceeaşi problemă şi ajunsese la aceleaşi concluzii contradictorii privind masele particulelor câmpului. În consecință, el abandonase această cale. Când Yang şi-a scris ecuațiile pe tablă, Pauli a sărit ca ars:

— Care este masa acestui câmp B? a întrebat el, anticipând răspunsul.

— Nu ştiu, a răspuns Yang cu glas cam pierit.

— Care este masa acestui câmp B? a întrebat din nou Pauli.

— Am studiat chestiunea, a spus Yang. E o problemă foarte complicată şi nu putem răspunde acum.

— Asta nu-i o scuză, a mormăit Pauli.[7]

Buimăcit, Yang s-a aşezat pe scaun în atmosfera de jenă generală. „Cred că trebuie să-l lăsăm pe Frank să continue", a

sugerat Oppenheimer. Yang şi-a reluat prezentarea. Pauli n-a mai pus nici o întrebare, dar era vizibil enervat. A doua zi, el i-a lăsat un bilet lui Yang, în care scria: „Regret că aţi făcut să fie aproape imposibil pentru mine să discut cu dumneavoastră după seminar.“[8]

*

Era o problemă de care pur şi simplu nu puteai scăpa. Fără masă, particulele de câmp ale teoriei Yang–Mills nu se potriveau cu aşteptările experimentale. Dacă nu aveau masă, aşa cum prezicea teoria, atunci ele trebuiau să fie omniprezente, la fel ca fotonul. Dar nici o asemenea particulă nu fusese niciodată observată. Metodele de renormare acceptate nu puteau fi aplicate.

Şi totuşi, era o teorie *frumoasă*.

„Ideea era frumoasă şi trebuia să fie publicată“, avea să scrie Yang. „Dar care este masa particulelor de etalonare? Nu aveam concluzii ferme, doar experienţe frustrante care arătau că acest caz e mult mai complicat decât electromagnetismul. Eram tentaţi să credem, din motive fizice, că particulele de etalonare încărcate nu pot fi de masă nulă.“[9]

Yang şi Mills au publicat în octombrie 1954 un articol în care şi-au descris rezultatele. Acolo ei spuneau: „Ne vom ocupa în viitor de problema masei cuantei [B], pentru care nu avem un răspuns satisfăcător.“[10]

N-au reuşit însă să avanseze în această direcţie şi şi-au îndreptat atenţia către alte lucruri.

CAPITOLUL 3

Oamenii se dovedesc obtuzi în această privință

În care Murray Gell-Mann descoperă stranietatea şi „Calea cu opt brațe“, Sheldon Glashow aplică teoria de câmp Yang–Mills în cazul forței nucleare slabe, iar oamenii se dovedesc obtuzi în această privință.

Yang şi Mills încercaseră să aplice teoria cuantică a câmpului la problema interacțiilor produse de forța tare, în speranța de a repeta succesul electrodinamicii cuantice. Dar au găsit că teoria nu putea fi renormată şi că prezicea particule de masă nulă acolo unde ar fi trebuit să fie particule masive. În mod evident, aceasta nu putea fi soluția pentru forța tare.

Dar cum stăteau lucrurile cu forța slabă?

Forța slabă era un adevărat mister. Fizicianul italian Enrico Fermi fusese obligat să invoce un nou tip de forță nucleară într-o teorie completă a dezintegrării beta, elaborată la începutul anilor '30. El a prezentat această teorie colegilor săi în timpul unei vacanțe de schi în Alpii italieni, în 1933, în preajma Crăciunului. Colegul său Emilio Segrè avea să povestească ulterior momentul: „[…] stăteam cu toții pe un pat într-o cameră de hotel şi eu abia puteam să rămân nemişcat în acea poziție, suferind cum eram după câteva căzături pe zăpada înghețată. Fermi era perfect conştient de importanța descoperirii sale şi spunea că e convins că va rămâne în istoria fizicii pentru acest articol, cel mai bun al său de până atunci.“[1]

Fermi a făcut o paralelă între forța slabă şi electromagnetism. Din teoria de tip electromagnetic creată astfel, el a putut deduce domeniul energiilor (şi deci al vitezelor) pe care le au electronii beta emişi. Predicțiile lui au fost confirmate de experimentele efectuate la Universitatea Columbia de fiziciana americană de

origine chineză Chien-Shiung Wu în 1940. Cu unele mici amendamente, teoria lui Fermi este valabilă şi astăzi.

Fermi a dedus că intensitatea interacțiilor dintre particulele implicate în radioactivitatea beta este de circa zece miliarde de ori mai slabă decât cea a interacțiilor dintre particulele încărcate electric. Este într-adevăr o forță slabă, dar ea are câteva consecințe profunde. Din cauza forței slabe, neutronii sunt în mod intrinsec instabili. Un neutron care se mişcă liber în spațiu va supraviețui intact în medie doar 18 minute. Acest comportament e neobişnuit pentru o particulă considerată fundamentală sau elementară.*

Desigur, era un pic cam mult să trebuiască să se invoce o nouă forță a naturii, doar pentru a explica un nou tip de interacție. Dar, pe măsură ce experimentatorii au început să examineze pleiada de particule noi care îşi manifestau prezența printre produşii ciocnirilor la energii înalte, au început să apară dovezi privind alte tipuri de particule care păreau a interacționa prin forța slabă.

*

În anii '30, dacă voiai să studiezi fizica particulelor elementare, trebuia să escaladezi un munte. Razele cosmice – fluxuri de particule de energii înalte care vin din spațiul cosmic – invadează în mod constant atmosfera superioară. Unele particule foarte energetice din aceste raze pot pătrunde în straturile mai joase ale atmosferei, straturi accesibile de pe vârful munților, unde se pot studia ciocnirile particulelor. Asemenea studii se bazează pe detectarea întâmplătoare a particulelor şi, din cauza

---

* Cei ce caută consecințe şi mai profunde ale interacțiilor slabe trebuie să privească nu mai departe de modelul solar standard, teoria actuală care descrie procesele ce au loc în Soare. Fuziunea protonilor (nuclee de hidrogen) pentru a forma nuclee de heliu în miezul Soarelui implică transformarea a doi protoni în doi neutroni prin intermediul forței slabe, însoțită de emisia a doi pozitroni şi a doi neutrini. (*N. a.*)

caracterului lor aleator, nu există două evenimente care să se petreacă în exact aceleaşi condiţii.

Fizicianul american Carl Anderson descoperise pozitronul lui Dirac în 1932. După patru ani, el şi colegul său american Seth Neddermeyer şi-au încărcat aparatura de detecţie a particulelor pe o platformă de transport şi au urcat-o pe Pikes Pike din Munţii Stâncoşi, la aproximativ 16 km vest de Colorado Springs.* În urmele lăsate de razele cosmice penetrante, fizicienii au descoperit o altă particulă nouă. Această particulă se comporta exact ca un electron, dar era deviată de un câmp magnetic într-o măsură mult mai mică.

Particula îşi curba traiectoria mai puţin decât un electron şi mai mult decât era deviat (în direcţie opusă) un proton cu aceeaşi viteză. Singura concluzie pe care puteai s-o tragi era că aveam de-a face cu un nou electron „greu“, cu o masă de aproximativ 200 de ori mai mare decât cea a unui electron obişnuit. Nu putea fi un proton, deoarece masa protonului este de circa 2 000 de ori mai mare decât masa electronului.**

Noua particulă a fost numită iniţial mezotron, ulterior prescurtat ca mezon. Era o descoperire nedorită. O versiune grea a electronului? Asta nu se potrivea cu nici o teorie sau presupunere privind modul în care trebuie să fie organizate cărămizile fundamentale ale naturii.

Intrigat, Isidor Rabi, fizician american născut în Polonia, şi-a pus întrebarea: „Cine a comandat asta?“[2] Willis Lamb avea să evoce acest sentiment de frustrare în conferinţa sa Nobel

---

* De fapt, camionul lor n-a putut ajunge până sus şi a trebuit să fie remorcat pe ultima porţiune de drum. Bugetul oamenilor de ştiinţă pentru asemenea experimente era extrem de limitat, dar ei au avut norocul să întâlnească un vicepreşedinte de la General Motors care testa pe munte un nou camion Chevrolet. Din amabilitate, acesta a dispus ca platforma savanţilor să fie remorcată şi a plătit înlocuirea motorului. (*N. a.*)

** Mai exact, raportul maselor de repaus ale protonului şi electronului (masele pe care aceste particule le-ar avea la viteză nulă) este egal cu 1 836. (*N. a.*)

din 1955, când a spus: „[…] cel care descoperă o nouă particulă elementară e recompensat de obicei cu un Premiu Nobel, dar acum o asemenea descoperire trebuia să fie pedepsită cu o amendă de 10 000 de dolari.“[3]

În 1947, o altă particulă nouă a fost descoperită în razele cosmice pe Pic du Midi, vârful din Pirineii francezi, de către fizicianul Cecil Powell şi echipa sa de la Universitatea din Bristol. S-a constatat că noua particulă avea o masă puțin mai mare decât mezonul: de 273 de ori masa electronului. Ea apărea în variantele pozitivă, negativă şi, ulterior, neutră electric.

Fizicienii aveau acum probleme cu denumirile. Mezonul a fost rebotezat mezon miu, prescurtat mai apoi ca miuon.* Noua particulă a fost numită mezon pi (pion). Pe măsură ce tehnicile pentru detectarea particulelor produse de razele cosmice au devenit mai sofisticate, porțile s-au deschis larg. Pionul a fost urmat curând de mezonul K (kaonul) pozitiv, de cel negativ şi de particula neutră lambda. Noi nume au proliferat. Răspunzând unei întrebări din partea unui tânăr fizician, Fermi remarca: „Tinere, dacă aş fi putut ține minte numele tuturor acestor particule, aş fi fost botanist.“[4]

Kaonii şi particula lambda se comportau ciudat. Aceste particule erau produse din abundență, semn al prezenței interacțiilor tari. Adesea ele erau generate în perechi care lăsau urme caracteristice în formă de „V“. Particulele produse se propagau apoi prin detector până se dezintegrau. Dezintegrarea dura mult mai mult decât producerea, sugerând că, deşi erau produse prin forța tare, modurile lor de dezintegrare erau guvernate de o forță mult mai slabă, aceeaşi forță, de fapt, care guvernează şi dezintegrarea radioactivă beta.

Izospinul nu putea explica straniul comportament al kaonilor şi al particulei lambda. Se părea că aceste particule posedă o proprietate suplimentară, necunoscută până atunci.

---

* Erau vremuri de confuzie. După cum avea să devină clar în scurt timp, mezonul miu nu aparținea de fapt clasei de particule care vor deveni cunoscute sub numele colectiv de „mezoni“. (*N. a.*)

Fizicianul american Murray Gell-Mann se afla în încurcătură. El îşi dăduse seama că putea da o explicaţie pentru comportamentul acestor noi particule folosind izospinul doar dacă presupunea că izospinii erau dintr-un motiv anume „deplasaţi“ cu o unitate. Acest fapt nu avea sens fizic, de aceea el a propus o nouă proprietate, pe care a numit-o ulterior *stranietate*, care să justifice această deplasare.* El avea să impună termenul apelând la cuvintele lui Francis Bacon: „Nu există o frumuseţe superioară care să nu aibă în ea o doză de stranietate.“[5]

Gell-Mann a emis ipoteza că, indiferent ce este ea, stranietatea, la fel ca izospinul, se conservă în interacţiile produse prin forţa tare. Într-o interacţie tare care implică o particulă „obişnuită“ (adică nestranie), producerea unei particule stranii cu o valoare a stranietăţii de +1 trebuie să fie însoţită de producerea unei alte particule stranii cu o valoare a stranietăţii egală cu –1, astfel încât stranietatea totală să se conserve. Acesta era motivul pentru care particulele stranii erau produse în perechi.

Conservarea stranietăţii explica şi de ce particulelor stranii le ia atât de mult timp ca să se dezintegreze. Odată formată particula stranie, transformarea ei înapoi într-o particulă obişnuită nu era posibilă printr-o interacţie tare, care era de aşteptat să se producă rapid, deoarece implica o modificare a stranietăţii (de la +1 sau –1 la zero). Particulele stranii supravieţuiau deci destul de mult înainte de a ceda în final forţei slabe, care nu respectă conservarea stranietăţii.

Nimeni nu ştia de ce.

*

În articolul său de importanţă crucială privind dezintegrarea beta, Fermi stabilise o analogie între forţa slabă şi electromagnetism. El făcuse estimările asupra intensităţilor relative ale forţelor implicate în interacţie folosind ca etalon masa electronului.

---

* Aproximativ aceeaşi idee a fost avansată cam în acelaşi timp de fizicienii japonezi Kazuhiko Nishijima şi Tadao Nakano, care au numit stranietatea „sarcină η“. (*N. a.*)

În 1941, Julian Schwinger se întrebase care ar fi consecințele dacă am presupune că forța slabă e transmisă de o particulă mult mai grea. El estimase că, dacă această particulă de câmp ar fi de câteva sute de ori mai grea decât protonul, atunci intensitățile forțelor slabă şi electromagnetică ar putea fi de fapt egale. Acesta a fost un prim indiciu că forța slabă şi cea electromagnetică ar putea fi *unite* într-o singură forță „electroslabă".

Yang şi Mills descoperiseră că, pentru a explica toate modurile în care protonii şi neutronii pot interacționa în nucleu, aveau nevoie de trei tipuri diferite de particule care să transmită forțele. În 1957, Schwinger a ajuns practic la aceeaşi concluzie privind interacțiile prin forța slabă. El a publicat un articol în care a avansat ipoteza că forța slabă e intermediată de trei particule de câmp. Două dintre acestea, W^+ şi W^- (în limbaj modern), sunt necesare pentru a asigura transferul sarcinii electrice în interacțiile slabe. O a treia particulă, neutră, este necesară pentru a explica situațiile în care nu se transferă sarcină electrică. Schwinger credea că această particulă era fotonul.

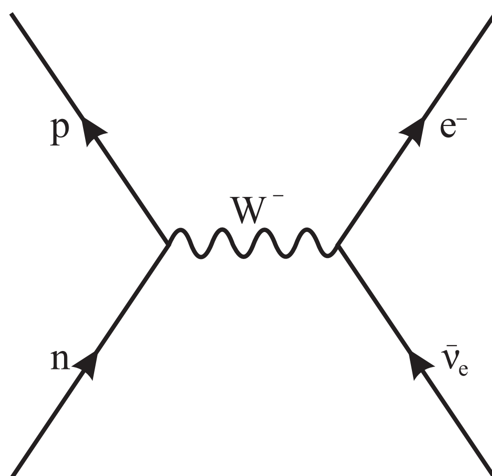


Figura 8. Mecanismul dezintegrării beta putea fi explicat acum prin dezintegrarea unui neutron (n) într-un proton (p), cu emisia unei particule W^- virtuale. Particula W^- se dezintegrează apoi într-un electron (e^-) şi un antineutrin ($\bar{\nu}_e$).

Conform schemei lui Schwinger, radioactivitatea beta ar arăta în felul următor. Un neutron se dezintegrează, emițând o particulă W^- şi transformându-se într-un proton. Particula de viață scurtă W^- se dezintegrează, la rândul ei, într-un electron de mare viteză (particula beta) şi un antineutrin (vezi figura 8).

Schwinger i-a cerut unuia dintre doctoranzii săi de la Harvard să se ocupe de această problemă.

Sheldon Glashow se născuse în America într-o familie de imigranți evrei ruşi. El absolvise Colegiul de Ştiințe din Bronx în 1950, unde fusese coleg de clasă cu Steven Weinberg. Împreună cu Weinberg studiase la la Universitatea Cornell, pe care o absolvise în 1954, pentru a deveni apoi unul dintre doctoranzii lui Schwinger la Harvard.

Particulele grele W pe care Schwinger le presupusese erau obligate să aibă sarcină electrică. Glashow şi-a dat imediat seama că acest fapt simplu însemna că era într-adevăr imposibil să se separe teoria forței slabe de cea a electromagnetismului. „Vrem să sugerăm", scria el într-o anexă a tezei sale de doctorat, „că o teorie pe deplin acceptabilă a acestor interacții poate fi realizată doar dacă ele sunt tratate împreună […]."[6]

Glashow a ajuns acum la aceeaşi teorie cuantică de câmp SU(2) pe care o elaborseră Yang şi Mills, luând de bună afirmația lui Schwinger că cele trei particule de câmp ale forței slabe erau cele două particule grele W şi fotonul. Un timp, el a crezut că reuşise să găsească o teorie unificată a forțelor slabă şi electromagnetică. Mai mult, credea că teoria este renormabilă.

Dar adevărul e că făcuse o serie de greşeli. Când acestea au fost descoperite, şi-a dat seama că cerea prea mult de la foton. Soluția lui a fost să lărgească simetria combinând câmpul Yang–Mills de etalonare SU(2) cu câmpul U(1) al electromagnetismului într-un produs scris ca SU(2)×U(1). Era mai mult un „amestec" al forțelor slabă şi electromagnetică decât o forță electroslabă complet unificată, dar avea avantajul că elibera fotonul

de povara responsabilității pentru proprietățile interacțiilor prin forța slabă.

Teoria mai avea nevoie de un purtător neutru al forței slabe. Glashow avea acum trei particule masive pentru forța slabă, echivalente cu tripletul particulelor B introduse prima oară de Yang și Mills. Acestea erau W^+, W^- și Z^0.*

În martie 1960 Glashow a susținut câteva conferințe la Paris. Aici l-a întâlnit pe Gell-Mann, de la Institutul de Tehnologie din California (Caltech), care lucra în anul sabatic** ca profesor invitat la Collège de France. Glashow i-a prezentat teoria de tip SU(2)×U(1) în timpul unui prânz. Gell-Mann l-a încurajat. „Faci un lucru bun“, a spus Gell-Mann, „dar oameni se vor dovedi obtuzi în privința asta.“[7]

Obtuză sau nu, comunitatea fizicienilor n-a prea fost impresionată de teoria lui Glashow. Așa cum descoperiseră Yang și Mills, teoria de câmp SU(2)×U(1) prezicea că purtătorii forței slabe trebuie să fie de masă nulă, ca și fotonul. Introducând „cu mâna“ masele în ecuații, s-ar fi ajuns din nou la o teorie nerenormabilă. La fel ca Yang și Mills înaintea lui, Glashow nu putea să-și imagineze cum ar reuși particulele de câmp să capete masă.

Existau și alte probleme. Interacțiile particulelor elementare implică una sau mai multe particule care se dezintegrează sau acționează împreună pentru a produce particule noi. Când asemenea interacții implică particule intermediare încărcate, se spune că reacțiile au loc prin „curenți“ încărcați, deoarece presupun „curgerea“ sarcinii de la particulele inițiale la cele finale. S-a anticipat că un purtător neutru al forței slabe (Z^0) s-ar manifesta experimental în forma unor interacții care nu implică o schimbare a sarcinii, de tipul „curenților neutri“. Dar nici o

---

* Glashow a numit inițial particula neutră B, conform lui Yang și Mills, dar ea este acum numită în mod obișnuit Z^0. (*N. a.*)

** An de studiu acordat periodic profesorilor universitari din anumite state, în care aceștia nu au obligații didactice. (*N. t.*)

dovadă privind asemenea curenți nu s-a putut găsi în dezintegrările particulelor stranii, care deveniseră atunci principala pistă pentru obținerea de date despre interacțiile slabe.

Glashow a forțat nota. El a susținut că Z^0 era pur şi simplu o particulă mult mai masivă decât particulele încărcate W, astfel încât interacțiile care implicau schimbul lui Z^0 erau în afara posibilităților de detecție ale experimentelor contemporane. Experimentatorii n-au fost impresionați.

*

Murray Gell-Mann se născuse la New York în 1929. Copil precoce, a intrat la Universitatea Yale pe când avea doar cincisprezece ani. Şi-a luat doctoratul la Institutul de Tehnologie din Massachusetts în 1951, la vârsta de 21 de ani. A lucrat o scurtă perioadă la Institutul de Studii Avansate de la Princeton, pentru a se muta mai întâi la Universitatea Illinois de la Urbana-Champaign, apoi la Universitatea Columbia din New York, apoi la Universitatea din Chicago, unde a lucrat cu Fermi şi a încercat să înțeleagă proprietățile particulelor stranii.

În 1955 a primit un post de profesor la Caltech, unde a lucrat împreună cu Feynman la teoria forței nucleare slabe. A început, de asemenea, să-şi îndrepte atenția spre problema clasificării puzderiei de particule elementare care fuseseră deja descoperite. Se puteau distinge mici regularități în această mulțime – particule care în mod clar aparțineau aceleiaşi specii, de exemplu –, dar trăsăturile individuale nu se potriveau între ele pentru a da o imagine coerentă.

Fizicienii particulişti introduseseră deja o taxonomie pentru a face măcar puțină ordine în această harababură. Existau două clase principale: *hadronii* (de la grecescul *hadros*, care înseamnă solid sau greu) şi *leptonii* (de la grecescul *leptos*, care înseamnă mic).

Clasa hadronilor conține subclasa *barionilor* (de la grecescul *barys*, care înseamnă tot greu). Acestea sunt particule mai grele

care simt forța nucleară tare: protonul (p), neutronul (n), lambda (Λ^0) şi alte două serii de particule care fuseseră descoperite în anii ’50 şi fuseseră numite sigma (Σ^+, Σ^0 şi Σ^-) şi xi (Ξ^0, Ξ^-). Clasa hadronilor mai conține şi subclasa *mezonilor* (de la grecescul *mésos*, care înseamnă „mijlociu“). Aceste particule simt forța tare, dar sunt de masă intermediară, ca, de pildă, pionii (π^+, π^0 şi π^-) şi kaonii (K^+, K^0 şi K^-).

Din clasa leptonilor fac parte electronul (e^-), miuonul (μ^-) şi neutrinul (ν). Acestea sunt particule uşoare, care nu simt forța nucleară tare. Atât barionii, cât şi leptonii sunt *fermioni*, numiți după Enrico Fermi. Ei sunt caracterizați prin spini semi-întregi. Barionii şi leptonii menționați mai sus au toți spinul ½, şi pot avea deci două orientări ale spinului, +½ (spinul în sus) şi –½ (spinul în jos). Fermionii se supun principiului de excluziune al lui Pauli.

Situat în afara clasei hadronilor şi leptonilor era fotonul, purtătorul forței electromagnetice. Fotonul este un *boson*, numit după fizicianul indian Satyendra Nath Bose. Bosonii sunt caracterizați prin numere cuantice de spin întregi şi nu se supun principiului de excluziune al lui Pauli. Alți purtători de forță, precum particulele ipotetice W^+, W^- şi Z^0, erau presupuşi a fi bosoni de spin întreg. Bosonii cu spinul zero sunt şi ei posibili, dar nu sunt particule care transmit forța. Mezonii sunt exemple de bosoni de spin zero. Clasificarea particulelor cunoscută pe la 1960 e sintetizată în figura 9.

Era clar că în toată această confuzie trebuia să existe o regularitate, un echivalent pentru particule al tabelului periodic al lui Mendeleev. Dar care era această regularitate? Avea ea o explicație mai profundă?

Gell-Mann a încercat inițial să construiască un model dintr-un triplet fundamental de particule constând din proton, neutron şi lambda, folosindu-le drept cărămizi pentru a construi toți ceilalți hadroni. Dar apărea o mare încurcătură. Nu era deloc limpede de ce aceste particule trebuie considerate mai „fundamentale“

Hadroni

Barioni			Mezoni			Leptoni		
Ξ^-	Ξ^0							
Σ^-	Σ^0	Σ^+						
	Λ^0							
	n	p						
			K^-	$\bar{K}^0$ K^0	K^+			
			π^-	π^0	π^+			
						μ^-		
						e^-		
		Foton		γ			ν	

Masa (nu e la scară) →

	Fermioni			Bosoni			Leptoni		
Sarcină	–1	0	+1	–1	0	+1	–1	0	+1
Spin	½			0/1			½		

Figura 9. Taxonomia adoptată de fizicienii particulişti pe la 1960 ajutase la organizarea particulelor cunoscute în diferite clase. Acestea erau hadronii (barioni şi mezoni) şi leptonii. Situat în afara acestei clasificări era fotonul, particula care transmite forța electromagnetică.

decât celelalte. Gell-Mann şi-a dat seama că încerca să ajungă la o explicație fundamentală înainte de a stabili un aranjament adecvat. Era ca şi cum am încerca să ne imaginăm care sunt cărămizile elementelor chimice înainte de a cunoaşte mai întâi poziția fiecărui element în tabelul periodic.

Gell-Mann credea că la baza unui asemenea tablou ar putea sta un grup de simetrie globală, un mod de a organiza particulele astfel încât relațiile dintre ele să poată fi dezvăluite. În acea etapă el căuta doar un mod de a reclasifica particulele, şi nu încerca să elaboreze o teorie de câmp Yang–Mills, care ar fi necesitat o simetrie locală.

Ştia că avea nevoie de un grup de simetrie continuă mai mare decât U(1) şi SU(2) pentru a include tot ce era cunoscut pe atunci, dar nu ştia exact cum să procedeze. În acel moment lucra ca profesor invitat la Collège de France din Paris. Deloc surprinzător, cantitățile mari de vin franțuzesc bun, consumate la prânz cu colegii lui francezi, nu l-au ajutat să găsească imediat calea către o soluție.

Vizita lui Glashow la Paris în martie 1960 a fost deci mai mult decât o simplă încurajare. Gell-Mann a fost intrigat de teoria SU(2)×U(1) a lui Glashow. El a început să înțeleagă cum ar putea extinde grupul de simetrie la dimensiuni mai mari. Astfel inspirat, a încercat teorii cu tot mai multe dimensiuni. A încercat trei, patru, cinci, şase şi şapte dimensiuni, urmărind să găsească o structură care să nu corespundă produsului lui SU(2) cu U(1). „În acel moment, am spus: «Destul!» N-am avut tăria, după ce băusem atâta vin, să încerc opt dimensiuni.“[8]

Se pare că vinul nici n-a dezlegat limbile. Colegii cu care Gell-Mann obişnuia să bea la prânz erau matematicieni care i-ar fi putut rezolva aproape imediat problema. Dar el n-a discutat niciodată cu ei despre asta.

Glashow a acceptat oferta lui Gell-Mann de a i se alătura la Caltech şi, la scurt timp după ce s-au întors de la Paris, cei doi fizicieni au căutat împreună o soluție. Dar, abia după o

discuție cu matematicianul Richard Block de la Caltech, a descoperit Gell-Mann că grupul Lie SU(3) oferea exact structura pe care o căuta. La Paris, el renunțase tocmai când era pe punctul de a face singur această descoperire.

Cea mai simplă reprezentare, aşa-numita reprezentare „ireductibilă" a grupului SU(3), este un triplet fundamental. Realitatea e că şi alți teoreticieni încercaseră să construiască un model bazat pe grupul de simetrie SU(3) şi folosiseră protonul, neutronul şi particula lambda drept reprezentare fundamentală. Gell-Mann parcusese deja acest drum şi nu voia să repete experiența. A sărit pur şi simplu peste reprezentarea fundamentală şi şi-a îndreptat atenția asupra următoarei reprezentări.

Una dintre reprezentările lui SU(3) constă dintr-un spațiu cu opt dimensiuni. „Rotind" o particulă de pe o anumită direcție a acestui spațiu, o transformăm într-o particulă de pe altă direcție, la fel cum „rotind" izospinul neutronului în grupul de simetrie SU(2) îl transformăm într-un proton. Dacă Gell-Mann izbutea să plaseze cumva o particulă pe fiecare dimensiune, atunci poate că ar fi început să înțeleagă natura relațiilor fundamentale dintre ele. Era oare o simplă coincidență faptul că existau opt barioni – protonul, neutronul, lambda, trei particule sigma şi două particule xi?

Aceste particule se puteau distinge prin valorile sarcinii electrice, ale izospinului şi stranietății. Reprezentați într-un grafic valoarea stranietății în funcție de sarcină sau izospin şi veți obține un tablou hexagonal cu o particulă în fiecare vârf şi două particule în centru (vezi figura 10). Tabloul cerea ca protonul, neutronul şi particula lambda să fie incluse în schemă, iar Gell-Mann trebuie să fi găsit în asta o justificare pentru decizia de a nu atribui aceste particule reprezentării fundamentale.

Când Gell-Mann a făcut o analiză similară pentru mezoni, a găsit că trebuia să-l includă pe anti-K^0, dar tot îi mai lipsea o particulă. Echivalentul mezonic al lui lambda „era absent". Prinzând curaj, el a prezis că trebuie să mai existe un al optulea mezon cu sarcină electrică nulă şi stranietate zero.

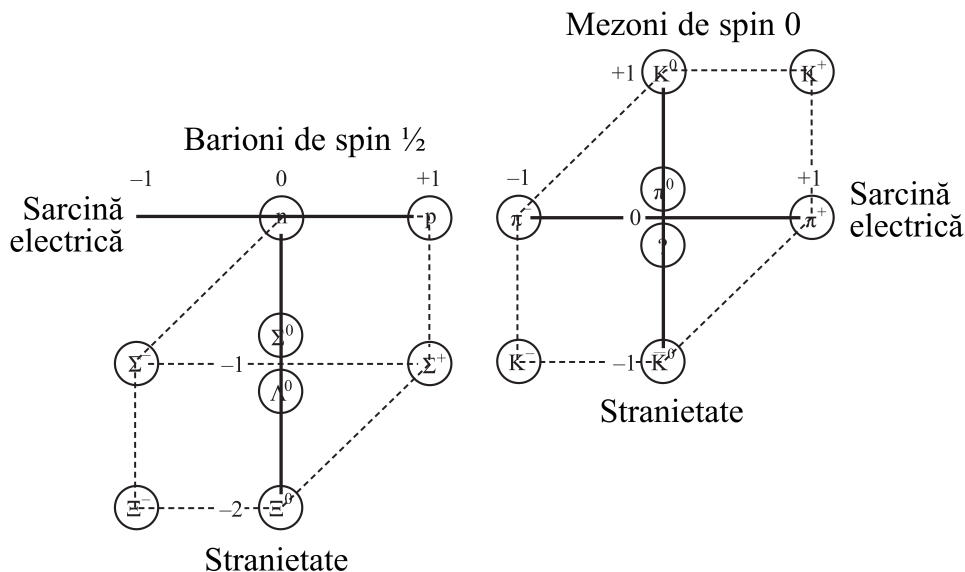


Figura 10. Calea cu opt brațe. Gell-Mann a descoperit că putea potrivi mezonii şi barionii, inclusiv neutronul (n) şi protonul (p), în două reprezentări de tip octet ale grupului de simetrie globală SU(3). Dar existau doar şapte particule în reprezentarea pentru mezoni. O particulă, echivalentul mezonic al lui Λ^0, lipsea. Această particulă a fost găsită câteva luni mai târziu de Luis Alvarez şi echipa lui de la Berkeley. Ei au numit-o eta, η.

Gell-Mann descoperise regularitățile celor doi „octeți“ de particule bazându-se pe o reprezentare opt-dimensională a grupului de simetrie globală SU(3). A numit-o „Calea cu opt brațe“, referindu-se pe jumătate în glumă la învățăturile lui Buddha despre cele opt trepte către Nirvana.* Şi-a încheiat articolul despre Calea cu opt brațe în preajma Crăciunului din 1960, iar lucrarea a fost publicată ca preprint** Caltech la începutul lui

---

* Acestea sunt: înțelegere corectă, gândire corectă, vorbire corectă, acțiune corectă, mod de viață corect, efort corect, atenție corectă şi contemplare corectă. (*N. a.*)

** Versiune a unui articol care nu a fost încă publicat într-o revistă cu referenți. A fost şi este foarte mult folosit de fizicieni pentru comunicarea rapidă a rezultatelor şi asigurarea priorității. În epoca modernă postarea on-line a preprinturilor în baza de date arXiv, creată

1961. Particula pe care o prezisese pentru a completa octetul mezonilor a fost descoperită peste câteva luni de fizicianul Luis Alvarez şi echipa lui de la Berkeley. Ei au numit noua particulă eta, η.

*

Gell-Mann lucra independent, dar nu era singurul teoretician care căuta un tablou regulat. Yuval Ne'eman a fost un nume apărut târziu pe firmamentul fizicii teoretice. Când Gell-Mann se dusese la Yale la vârsta fragedă de 15 ani, Ne'eman, originar din Tel Aviv, se înrolase în Haganah, mişcarea evreiască clandestină din ceea ce era pe atunci Palestina sub mandat britanic. Comandase un batalion de infanterie în războiul israeliano-arab din 1948 şi ocupase funcţii de conducere în serviciile secrete israeliene.

Ne'eman ajunsese la gradul de colonel în forţele armate când s-a hotărât să caute un prilej de a studia pentru a obţine un doctorat în fizică. Moshe Dayan, şeful Marelui Stat-Major, a acceptat să-l trimită ca ataşat militar la ambasada Israelului de la Londra. Dayan s-a gândit că Ne'eman va putea studia pentru doctorat în timpul liber.

Ne'eman voise mai întâi să studieze relativitatea la King's College din Londra, dar şi-a dat seama imediat că, din cauza traficului aglomerat, îi era imposibil ca, plecând de la sediul ambasadei din Kensington, să ajungă acolo la timp pentru a participa la cursuri şi seminare. S-a orientat atunci spre Imperial College şi fizica particulelor. La Imperial College a fost îndrumat către teoreticianul pakistanez Abdus Salam.

Ne'eman lucra serile şi în weekenduri. Începuse să caute grupurile de simetrie care s-ar potrivi cu particulele cunoscute, şi a identificat cinci candidaţi, între care şi SU(3). Entuziasmat iniţial de ideea unui grup de simetrie care avea o schemă de forma

---

initial pentru domeniul energiilor înalte, s-a extins şi la alte domenii, vezi http://arxiv.org/. (*N. t.*)

Stelei lui David, Ne'eman s-a oprit în cele din urmă la SU(3). Şi-a publicat propria versiune a Căii cu opt brațe în iulie 1961.

Salam s-a arătat la început sceptic, dar, când pe birou i-a sosit versiunea preliminară a articolului lui Gell-Mann, a lăsat imediat deoparte orice rezervă. În ciuda faptului că a avut un uşor avans la start, Ne'eman a fost întrecut la publicare de Gell-Mann (deşi articolul lui Ne'eman fusese de fapt primul trimis spre publicare într-o revistă de fizică). Dar n-a fost dezamăgit. Dimpotrivă, s-a simțit în culmea fericirii că se afla într-o companie atât de bună.

Ne'eman şi Gell-Mann au participat la o conferință de fizica particulelor care a avut loc în iunie 1962 la Organizația Europeană pentru Cercetări Nucleare (CERN) de la Geneva. Au ascultat amândoi cu atenție rapoartele privind noile particule care mai fuseseră descoperite, un triplet format din ceea ce aveau să fie numite ulterior particulele sigma-star, cu valoarea stranietății egală cu –1, şi un dublet de particule xi-star cu stranietate –2.

Ne'eman şi-a dat seama imediat că aceste particule aparțineau altei reprezentări a lui SU(3), care avea dimensiunea egală cu zece. A înțeles într-o clipă că, din cele zece particule implicate în această reprezentare, nouă fuseseră deja găsite. Particula de care era nevoie pentru a completa tabloul trebuia să aibă sarcină negativă şi stranietatea egală cu –3.

El a ridicat mâna să ia cuvântul, dar Gell-Mann făcuse şi el exact aceeaşi legătură şi stătea în sală mai în față. De aceea Gell-Mann a fost cel care s-a ridicat în picioare pentru a prezice existența unei particule pe care a numit-o omega. Particula a fost descoperită în ianuarie 1964.

Tabloul fusese acum găsit, dar care era explicația fundamentală?

CAPITOLUL 4

Idei corecte aplicate într-o problemă greşită

În care Murray Gell-Mann şi George Zweig inventează cuarcii, iar Steven Weinberg şi Abdus Salam folosesc mecanismul Higgs pentru a da (în sfârşit!) masă particulelor W şi Z.

Fizicianul american de origine japoneză Yoichiro Nambu era teribil de îngrijorat.

Nambu studiase fizica la Universitatea Imperială din Tokyo, pe care a absolvit-o în 1942. A fost atras către domeniul fizicii particulelor elementare de reputația de care se bucurau Yoshio Nishina, Sin-Itiro Tomonaga şi Hideki Yukawa, întemeietorii fizicii particulelor elementare în Japonia. Dar nu existau la acea vreme fizicieni importanți în domeniul particulelor elementare la Tokyo, aşa că a studiat în schimb fizica stării solide.

Nambu a plecat din Tokyo în 1949 pentru a ocupa un post de profesor la catedra de fizică a Universității din Osaka. Trei ani mai târziu a fost invitat la Institutul de Studii Avansate de la Princeton. S-a mutat în 1954 la Universitatea din Chicago, unde a fost numit profesor după patru ani.

În 1956 a participat la un seminar al lui John Schrieffer despre noua teorie a supraconductibilității, pe care Schrieffer o elaborase împreună cu John Bardeen şi Leon Cooper. Aceasta era o aplicație elegantă a teoriei cuantice pentru a explica faptul că, atunci când sunt răcite sub o temperatură critică, anumite materiale cristaline îşi pierd complet rezistența electrică. Ele devin supraconductori.

Sarcinile de acelaşi semn se resping. Totuşi, electronii dintr-un supraconductor simt o *atracție* reciprocă slabă. Ce se întâmplă de fapt este că un electron liber care trece prin apropierea unui

ion încărcat pozitiv din rețeaua cristalină exercită o forță de atracție care deplasează puțin ionul, distorsionând astfel rețeaua. Electronul merge mai departe, dar rețeaua distorsionată continuă să vibreze înainte şi înapoi. Această vibrație produce un mic surplus de sarcină pozitivă, care atrage un al doilea electron.

Consecința acestei interacții este că o pereche de electroni (numită „pereche Cooper“), având spini şi impulsuri opuse, se deplasează prin rețea în mod concertat, mişcarea lor fiind mediată sau înlesnită de vibrațiile rețelei. Amintiți-vă că electronii sunt fermioni şi, ca atare, datorită principiului de excluziune a lui Pauli, nu pot ocupa aceeaşi stare cuantică. În schimb, perechile Cooper se comportă ca bosonii, care nu sunt supuşi unei asemenea constrângeri. Nu există nici o restricție asupra numărului de perechi care pot ocupa aceeaşi stare cuantică, iar la temperaturi scăzute ei se pot „condensa“, strângându-se într-o singură stare care poate atinge dimensiuni macroscopice.* Perechile Cooper din această stare nu întâmpină nici o rezistență la trecerea prin rețea, iar rezultatul este supraconductibilitatea.

Ce îl îngrijora pe Nambu era faptul că teoria părea să nu respecte invarianța la etalonare a câmpului electromagnetic. Cu alte cuvinte, părea să nu respecte conservarea sarcinii electrice.

Nambu s-a tot gândit la problemă şi a apelat la cunoştințele sale de fizica stării solide. El şi-a dat seama ca teoria Bardeen–Cooper–Schrieffer (BCS) a supraconductibilității e un exemplu de *rupere spontană a simetriei* aplicată câmpului de etalonare al electromagnetismului.

Există multe exemple familiare de rupere a simetriei. Un creion în echilibru pe vârful său e perfect simetric, dar foarte instabil. Când cade, o face pe o direcție anume (deşi aparent întâmplătoare) şi se spune că simetria e ruptă spontan. La fel, o bilă aşezată în vârful unui sombrero e perfect simetrică, dar instabilă. Bila se rostogoleşte într-o direcție anume (deşi aparent

---

* Lumina laserului este un exemplu de acest tip de condensare implicând fotoni. (*N. a.*)

întâmplătoare) şi se opreşte în borul pălăriei. În realitate, ceea ce produce căderea creionului sau rostogolirea bilei sunt micile fluctuații ale mediului înconjurător. Aceste fluctuații infime formează o parte a „zgomotului“ de fond.

Ruperea spontană a simetriei afectează starea de energie minimă, aşa numita stare „de vid“ a sistemului. Ca orice alt material, un supraconductor se presupune că are o stare de vid în care toate particulele au poziții fixe în structura rețelei, iar electronii rămân în repaus. Dar posibilitatea mişcării concertate a perechilor Cooper mediate de vibrațiile rețelei conduce la o stare de vid care are o energie *mai joasă*. În acest caz, simetria de etalonare U(1) a electromagnetismului e ruptă prin prezența unui alt câmp cuantic, ale cărui cuante sunt perechile Cooper. Legile care descriu dinamica electronilor în material rămân invariante la simetria de etalonare locală U(1), dar starea de vid nu e invariantă.

Nambu a înțeles că, deoarece perechile Cooper se află într-o stare de energie mai joasă, este acum nevoie de un aport de energie pentru a le desface. Electronii liberi astfel creați vor avea o energie suplimentară egală cu jumătate din energia necesară pentru a desface perechile. Această energie suplimentară va apărea ca o masă în plus. El a fost impresionat de aceste posibilități şi le-a rezumat câțiva ani mai târziu după cum urmează[1]:

> Ce s-ar întâmpla dacă un material supraconductor ar ocupa întregul univers, iar noi am trăi în el? Din moment ce nu putem observa adevăratul vid, starea fundamentală [de energie minimă] a acestui mediu ar deveni, de fapt, vidul. Atunci chiar şi particulele care erau lipsite de masă […] în vidul adevărat ar dobândi masă în lumea reală.

Rupe simetria şi vei obține particule cu masă – aşa suna raționamentul lui Nambu.

În 1961, Nambu şi fizicianul italian Giovanni Jona-Lasinio au publicat un articol care prezenta exact un asemenea mecanism. Pentru a-l face să funcționeze, ei au trebuit să recurgă la un câmp cuantic de fond care să creeze un vid „fals". În exemplul de mai sus, creionul cade atunci când interacționează cu „zgomotul" de fond, care rupe simetria. La fel, pentru ruperea simetriei într-o teorie cuantică de câmp este nevoie de un fond cu care să se interacționeze. Rezultă de aici că spațiul gol nu e, de fapt, gol. Conține energie sub forma unui câmp cuantic răspândit peste tot.

În modelul lor, acest vid fals oferea fondul necesar pentru ruperea simetriei într-o teorie a interacțiilor prin forțe tari implicând protoni şi neutroni ipotetici fără masă. Rezultatul a fost că s-au obținut într-adevăr protoni şi neutroni cu masă. Ruperea simetriei „activase" masele particulelor.

Dar lucrurile nu erau chiar atât de simple. Fizicianul britanic Jeffrey Goldstone a studiat şi el ruperea simetriei şi a stabilit că o consecință este crearea unei alte particule fără masă.

De altfel, Nambu şi Jona-Lasino se izbiseră de aceeaşi problemă în modelul lor. Pe lângă faptul că dădea masă protonilor şi neutronilor, modelul lor prezicea, de asemenea, particule de masă nulă formate din nucleoni şi antinucleoni. În articolul lor, ei încercaseră să argumenteze că acestea ar putea dobândi o masă mică, şi deci ar putea fi identificate cu pionii.

Aceste noi particule fără masă au fost în cele din urmă numite *bosoni Nambu–Goldstone*. Goldstone simțea instinctiv că apariția acestor particule ar putea fi un rezultat general, aplicabil tuturor simetriilor, iar în 1961 l-a ridicat la statutul de principiu. El a devenit cunoscut sub numele de *teorema Goldstone*.

Desigur, aceşti bosoni Nambu–Goldstone erau afectați de exact aceleaşi probleme ca şi particulele fără masă ale teoriilor cuantice de câmp. Orice noi particule fără masă prezise de teorie era de aşteptat să fie omniprezente precum fotonii. Dar,

bineînțeles, aceste particule suplimentare nu fuseseră observate niciodată.

Ruperea spontană a simetriei promitea o soluție la problema particulelor fără masă din teoriile de câmp Yang–Mills. Totuşi, ruperea simetriei trebuia însoțită de şi mai multe particule fără masă, care nu fuseseră observate niciodată. Când a fost rezolvată o problemă, a apărut o alta. Pentru a progresa, trebuia găsită cumva o cale de a evita sau de a învinge teorema Goldstone.

*

Atât Gell-Mann, cât şi Ne'eman săriseră peste reprezentarea fundamentală a grupului de simetrie globală SU(3). Ei constataseră că pot găzdui protonul şi neutronul în următoarea reprezentare, opt-dimensională, aplicată barionilor. Concluzia era cât se poate de clară. Cei opt membri ai octetului barionic – inclusiv protonul şi neutronul – trebuie să fie particule compuse, formate din alte trei particule fundamentale necunoscute ştiinței experimentale. O fi fost clară conluzia, dar aceasta era o ipoteză cu câteva consecințe foarte incomode.

În 1963, Robert Serber de la Universitatea Columbia a început să combine în joacă trei particule fundamentale (neprecizate) pentru a crea cei doi octeți ai Căii cu opt brațe. În acest model, fiecare membru al octetului barionic urma să fie format din combinații de trei noi particule, iar octetul mezonilor din combinații de particule fundamentale şi antiparticulele lor. Când, în luna martie a acelui an, Gell-Mann a venit la Universitatea Columbia pentru a susține o serie de conferințe, Serber l-a întrebat ce crede despre această idee.

Conversația a avut loc în timpul prânzului la clubul facultății. „I-am arătat că poate să ia trei piese şi să construiască din ele protoni şi neutroni", a explicat Serber. „Piesele şi anti-piesele pot alcătui mezoni. Aşa că i-am spus: «De ce nu luați asta în considerare?»"[2]

Gell-Mann nu a fost receptiv. L-a întrebat pe Serber care ar trebui să fie sarcinile electrice ale acestui nou triplet de particule elementare, lucru la care acesta nu se gândise.

„Era o idee absurdă“, a spus Gell-Mann. „Am luat un şerveţel şi am făcut pe dosul lui calculele necesare pentru a arăta că particulele ar trebui să aibă sarcini electrice fracţionare – egale cu –1/3 sau +2/3 – pentru a alcătui un proton sau un neutron cu sarcini egale cu +1 sau 0.“[3]

Serber a fost de acord că era un rezultat îngrozitor. După doar doisprezece ani de la descoperirea electronului, fizicienii americani Robert Millikan şi Harvey Fletcher efectuaseră celebrul lor experiment cu „picăturile de ulei“, în care au măsurat unitatea fundamentală de sarcină electrică a unui electron individual. Exprimată în unităţi standard, sarcina electronului e un număr complicat cu multe cifre zecimale*, dar s-a constatat rapid că toate particulele încărcate au sarcini care sunt multipli întregi ai acestei unităţi fundamentale. Niciodată în cei 54 de ani care se scurseseră de când fusese stabilită noţiunea de unitate fundamentală de sarcină, nu apăruse cel mai mic indiciu că ar putea exista particule cu sarcina mai mică decât aceasta. În discuţiile lor ulterioare, Gell-Mann a numit noile particule ale lui Serber „quorks“, un cuvânt lipsit de sens, ales în mod deliberat pentru a sublinia absurditatea sugestiei. Serber a crezut că termenul era derivat din „quirk“**, deoarece Gell-Mann afirmase că astfel de particule ar fi într-adevăr o ciudăţenie a naturii.

Dar, în ciuda consecinţelor înspăimântătoare, logica era inevitabilă. Grupul de simetrie SU(3) are o reprezentare fundamentală, iar faptul că particulele cunoscute puteau fi încadrate în cei doi octeţi sugera şi un triplet de particule fundamentale. Sarcinile fracţionare erau problematice, dar, poate, se gândea

---

* Valoarea acceptată în prezent pentru sarcina electronului este 1,602176487 (40) × 10^{-19} Coulombi, unde cifrele din paranteză reprezintă marja de eroare a ultimelor două zecimale. (*N. a.*)

** În traducere, calambur, capriciu, ciudăţenie. (*N. t.*)

acum Gell-Mann, dacă acei „quorks“ erau captivi sau „închişi“ pe vecie în interiorul hadronilor mai mari, aceasta ar putea explica de ce particulele cu sarcini fracționare nu fuseseră văzute niciodată în experimente.

Pe când ideile lui Gell-Mann prindeau contur, el a dat din întâmplare peste un pasaj din cartea lui James Joyce *Finnegans Wake*, care i-a dat o sugestie pentru numele acestor noi particule ridicole:

Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark.
*And sure any he has it's all beside the mark.**

„Asta e!“ a exclamat el. „Trei cuarci [*quarks*] formează un neutron şi un proton!“ Cuvântul nu prea rima cu varianta sa inițială „quork“, dar era suficient de apropiat. „Aşadar, ăsta a fost numele pe care l-am ales. Toată treaba nu-i decât o glumă. E o reacție împotriva limbajului ştiințific pretențios.“[4]

Gell-Mann a publicat în februarie 1964 un articol de două pagini în care a explicat această idee. El s-a referit la cei trei cuarci folosind simbolurile u, d şi s. Deşi nu a spus explicit în articol, acestea veneau de la „up“ (u), cu o sarcină electrică de +2/3, „down“ (d), cu o sarcină de –1/3, şi „strange“ (s) tot cu sarcina –1/3. Barionii sunt formați din diverse permutări ale acestor trei cuarci, iar mezonii din combinații de cuarci şi anticuarci.

În această schemă, protonul constă din doi cuarci de tip up şi unul de tip down (uud), cu o sarcină electrică totală egală cu +1. Neutronul constă dintr-un cuarc up şi doi down (udd), cu o sarcină electrică totală egală cu zero. Pe măsură ce modelul era elaborat, devenea evident ca izospinul este legat de conținutul în cuarci up şi down al particulei compuse. Neutronul şi protonul au izospini ce se obțin ca jumătate din numărul de cuarci up

---

* În traducere liberă: „Trei cuarci pentru conu' Mark! / Desigur… nu prea are el vreun franc. / Şi sigur tot ce are nu-i decât un banc.“ (*N. t.*)

minus jumătate din numărul de cuarci down.* Pentru neutron aceasta dă izospinul ½ × (1 – 2), sau – ½ . „Rotația“ izospinului neutronului înseamnă schimbarea unui cuarc down într-un cuarc up, producând un proton cu izospinul ½ × (2 – 1), sau + ½ . Conservarea izospinului devine acum conservarea numărului de cuarci. Radioactivitatea beta sugerează conversia unui cuarc down dintr-un neutron într-un cuarc up, transformând neutronul în proton, cu emisia unei particule W^-, aşa cum se arată în figura 11.

Particulele „stranii“ au valori ale stranietății care se obțin simplu ca minusul numărului de cuarci strange prezenți.** Devine evident că un grafic al sarcinii sau al izospinului în funcție de stranietate reflectă pur şi simplu conținutul în cuarci al particulei, diverse combinații de cuarci apărând în locuri diferite pe hartă (figura 12).

Gell-Mann lucra din nou de unul singur, dar nu era singurul teoretician aflat pe urmele unei explicații fundamentale. Întors din Marea Britanie în Israel de vreo doi ani, Ne'eman lucrase împreună cu matematicianul Haim Goldberg la o idee foarte speculativă privind un triplet fundamental, dar ei nu îndrăzniseră să declare ca acestea ar putea fi particule „reale“ cu sarcini electrice fracționare.

Cam în aceeaşi perioadă când au fost tipărite speculațiile lui Gell-Mann, George Zweig, fost student de la Caltech, elaborase o schemă perfect echivalentă, bazată pe un triplet fundamental de particule pe care le-a numit „aşi“. El şi-a imaginat că barionii ar putea fi construiți din tripleți de aşi, iar mezonii din dubleți de aşi şi anti-aşi. Zweig lucra ca asistent postdoctoral asociat la CERN şi şi-a publicat ideile în ianuarie 1964 într-un

---

* Relația este puțin mai complicată. De fapt, izospinul e dat de ½ × (numărul de cuarci up minus numărul de cuarci anti-up) – ½ × (numărul de cuarci down minus numărul de cuarci anti-down). (*N. a.*)

** Din nou, relația e un pic mai complicată. Stranietatea se calculează ca minus (numărul de cuarci strange minus numărul de cuarci anti-strange). (*N. a.*)

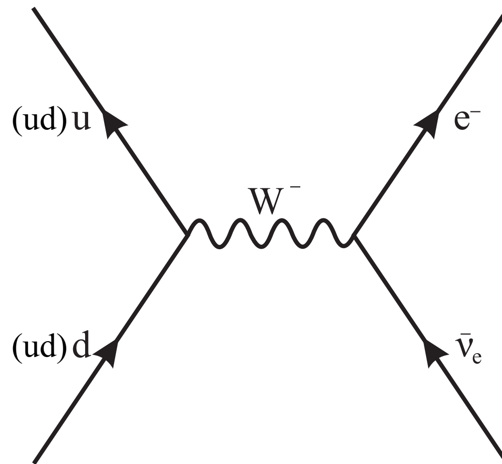


Figura 11. Mecanismul dezintegrării nucleare beta se explică acum în funcție de dezintegrarea prin forța slabă a unui cuarc down din neutron (d) într-un cuarc up (u), care transformă neutronul în proton, cu emisia unei particule W^- virtuale.

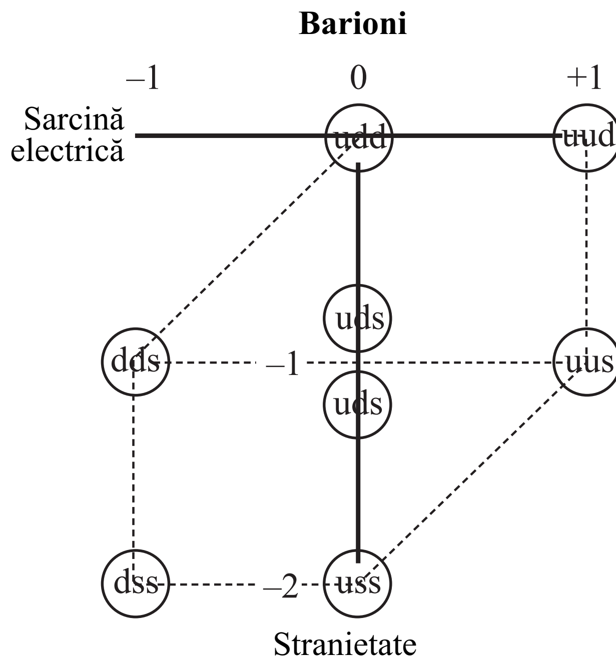


Figura 12. Calea cu opt brațe poate fi explicată simplu în funcție de diversele combinații posibile de cuarci up, down şi strange, ilustrate aici pentru octetul barionic. Particulele Λ^0 şi Σ^0 sunt ambele compuse din cuarci up, down şi strange, dar diferă ca izospin. Λ^0 are izospinul 0, iar Σ^0 are izospinul 1. Această diferență poate fi atribuită diverselor combinații posibile ale funcțiilor de undă ale cuarcilor up şi down. Λ^0 e format dintr-o combinație antisimetrică (ud – du), Σ^0 dintr-o combinație simetrică (ud + du).

preprint CERN. Văzând apoi articolul lui Gell-Mann, Zweig s-a pus rapid pe lucru pentru a-şi dezvolta modelul, a produs un alt preprint CERN de 80 de pagini şi l-a trimis spre publicare prestigioasei reviste *Physical Review*.

A fost desfiinţat de referenţii revistei. Articolul n-a fost publicat niciodată.

Gell-Mann era deja un fizician cunoscut, cu multe descoperiri importante la activ, şi putea fi iertat pentru „eroarea" de judecată privind cuarcii. Ca tânăr asociat postdoctoral, Zweig nu se afla într-o asemenea poziţie fericită. Atunci când, la scurt timp după aceea, a căutat un post la o universitate de vârf, unul dintre membrii facultăţii, un respectabil teoretician mai în vârstă, a declarat că modelul aşilor e lucrarea unui şarlatan. Zweig n-a primit postul şi a revenit la Caltech spre sfârşitul lui 1964. Mai târziu, Gell-Mann s-a străduit să-i asigure lui Zweig recunoaşterea pentru rolul său în descoperirea cuarcilor.

Modelul cuarcilor era o schemă simplificatoare frumoasă, dar de fapt nu era mai mult decât rezultatul potrivelii unor tipare. Nu exista practic nici o bază experimentală pentru el. Gell-Mann nu şi-a susţinut cauza, fiind mai degrabă rezervat în legătură cu statutul noilor particule. Vrând să evite angajarea în dezbateri filozofice privind realitatea particulelor care nu pot fi văzute în principiu niciodată, el a numit cuarcii „obiecte matematice". Unii au interpretat asta în sensul că Gell-Mann n-ar fi crezut că cuarcii sunt alcătuiţi din „materie" reală, că sunt entităţi care există în realitate şi că se pot combina producând efecte reale.

Zweig a fost mai curajos (sau, în funcţie de felul în care interpretăm, mai nesăbuit). În al doilea preprint CERN el scrisese: „Există, de asemenea, şansa extremă ca modelul să fie o aproximaţie mai bună a naturii decât ne închipuim, iar aşii cu sarcini fracţionare să se găsească din plin înăuntrul nostru."[5]

*

Fizicianul Philip Anderson, care lucra în domeniul stării solide, nu credea în teorema lui Goldstone. Era evident, din numeroase

exemple concrete din fizica stării solide, că bosonii Nambu–Goldstone nu sunt produşi întotdeauna când simetriile de etalonare sunt rupte spontan. Simetriile erau rupte tot timpul, şi totuşi fizicienii stării solide nu erau deloc copleşiţi din cauza asta de şuvoaie de particule fără masă, asemănătoare fotonului. Nu existau particule fără masă generate în interiorul supraconductorilor, de pildă. Ceva nu era tocmai în regulă.

În 1963, Anderson a sugerat că problemele cu care se luptau teoreticienii câmpurilor cuantice s-ar putea rezolva oarecum de la sine[6]:

> Considerând analogia cu supraconductibilitatea, este deci probabil ca drumul să fie acum deschis […] fără nici un fel de dificultăţi legate de bosonii de etalonare Yang–Mills de masă nulă ori de bosonii [Nambu–]Goldstone de masă nulă. Aceste două tipuri de bosoni par să se poată „anihila reciproc", lăsând doar bosoni de masă finită.

Putea fi într-adevăr totul atât de simplu? Să fie acesta un caz în care două rele să dea un lucru bun? Articolul lui Anderson a provocat o controversă minoră. Când argumentele şi contraargumentele şi-au făcut apariţia în presa ştiinţifică, câţiva fizicieni le-au studiat cu atenţie.

A urmat o serie de articole care prezentau mecanisme detaliate de rupere spontană a simetriei, în care diverşi bosoni fără masă „se anihilau reciproc" cu adevărat, lăsând doar particule masive. Aceste articole au fost publicate în mod independent de fizicienii belgieni Robert Brout şi Francois Englert, de fizicianul englez Peter Higgs de la Universitatea din Edinburgh, şi de Gerald Guralnik, Carl Hagen şi Tom Kibble de la Imperial College din Londra.* Mecanismul e cunoscut sub numele de

---

* Aceste trei articole au fost publicate toate în 1964 în acelaşi volum (13) al revistei *Physical Review Letters*, la paginile 321–323 şi, respectiv, 508–509 şi 585–587. (*N. a.*)

mecanism Higgs (sau, în unele medii mai preocupate de democrația descoperirilor, mecanism Brout–Englert–Higgs–Hagen–Guralnik–Kibble – BEHHGK, sau mecanismul „beck“).

Mecanismul funcționează astfel. O particulă de câmp fără masă, cu spinul 1 (un boson), se deplasează cu viteza luminii şi are două „grade de libertate“, ceea ce înseamnă că amplitudinea undei sale poate oscila în două dimensiuni perpendiculare (adică, transversale) pe direcția de-a lungul căreia se deplasează. Dacă particula se mişcă, să spunem, pe direcția *z*, atunci amplitudinea undei poate oscila doar pe direcțiile *x* şi *y* (stânga/dreapta şi sus/jos). Pentru foton, cele două grade de libertate sunt asociate cu polarizarea circulară spre stânga şi polarizarea circulară spre dreapta. Aceste stări pot fi combinate pentru a forma stările mai familiare de polarizare liniară: orizontală (pe direcția *x*) şi verticală (pe direcția *y*). Pentru lumină nu există polarizare pe o a treia dimensiune.

Pentru a schimba această stare este necesar să se introducă un câmp cuantic de fond, numit adesea câmp Higgs, care să rupă simetria.* Câmpul Higgs este caracterizat de forma *curbei de energie potențială*.

Ideea unei curbe a energiei potențiale este relativ simplă. Imaginați-vă un pendul oscilând înainte şi înapoi în jurul poziției de echilibru. Când pendulul urcă în timpul balansului, el îşi reduce viteza, se opreşte, apoi oscilează înapoi în sens contrar. În acest punct, toată energia mişcării sale (energia cinetică) s-a transformat în energie potențială înmagazinată în pendul. Când pendulul oscilează înapoi, energia potențială e eliberată ca energie cinetică de mişcare, iar viteza lui creşte. În punctul cel mai de jos al oscilației, când pendulul e orientat pe verticală în jos, energia cinetică este maximă, iar energia potențială e zero.

---

* Spre deosebire de alte câmpuri cuantice pe care le-am întâlnit până acum în această carte, câmpul Higgs este un câmp „scalar“ – el are o mărime în fiecare punct din spațiu-timp, dar nu are nici o direcție. Cu alte cuvinte, el „nu trage“ şi „nu împinge“ în vreo anume direcție anume. (*N. a.*)

Dacă reprezentăm grafic energia potențială în funcție de unghiul de deplasare a pendulului față de verticală, obținem o parabolă – vezi figura 13(a). Minimul în această curbă de energie potențială este evident punctul în care deplasarea pendulului e zero.

Curba energiei potențiale a câmpului Higgs diferă într-un mod subtil de cea din exemplul de mai sus. În locul unghiului de deplasare, reprezentăm deplasarea sau valoarea câmpului însuși. În partea cea mai de jos a curbei există o mică proeminență, nu prea diferită de vârful unui sombrero, sau de adâncitura din fundul unei sticle de şampanie. Prezența acestei proeminențe face ca simetria să se rupă. Pe măsură ce câmpul se răceşte şi îşi pierde energia potențială, el cade în mod aleator, asemenea creionului care se răstoarnă, într-o vale a curbei (curba e de fapt tridimensională). Dar, de această dată, punctul situat cel mai jos pe curbă corespunde unei valori a câmpului diferite de zero. Fizicienii spun că în acest caz există o valoare medie pe vid diferită de zero. Ea reprezintă un vid „fals“, ceea ce înseamnă că vidul nu e complet gol – el conține valori diferite de zero ale câmpului Higgs.

Prin ruperea simetriei se creează un boson Nambu–Goldstone fără masă. Acesta poate fi acum „absorbit“ de câmpul bosonic de spin 1, pentru a genera un al treilea grad de libertate (înainte/înapoi). Amplitudinea undei particulei câmpului poate acum să oscileze în toate cele trei dimensiuni, inclusiv în direcția pe care se propagă. Particula capătă „adâncime“ (vezi figura 14).

În mecanismul Higgs, obținerea celei de-a treia dimensiuni echivalează oarecum cu aplicarea unei frâne. Particula este încetinită într-o măsură care depinde de intensitatea interacției ei cu câmpul Higgs.

Fotonul nu interacționează cu câmpul Higgs şi continuă să se mişte netulburat, cu viteza luminii. El rămâne fără masă. Particulele care interacționează cu câmpul capătă profunzime, câştigă energie şi sunt încetinite, câmpul din jurul lor frânându-le

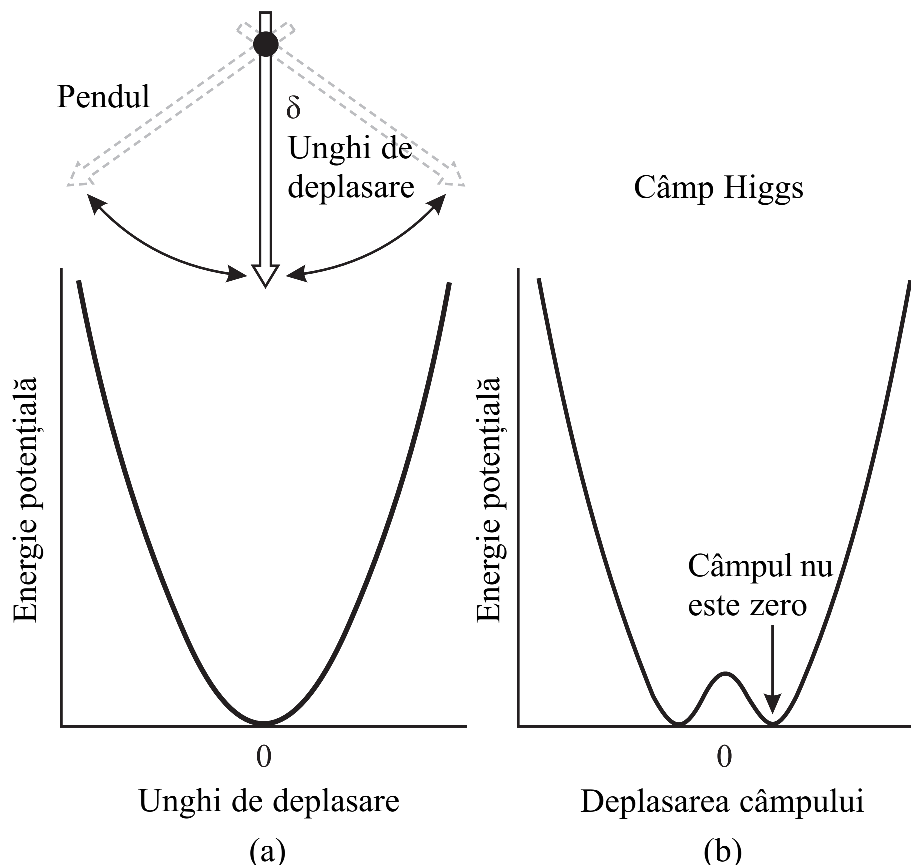


Figura 13. (a) În cazul unui pendul simplu fără frecare, curba energiei potențiale seamănă cu o parabolă, iar energia potențială nulă corespunde unei deplasări a pendulului egale cu zero. Curba energiei potențiale pentru câmpul Higgs (b) are însă altă formă. Acum energia potențială nulă corespunde unei deplasări finite (a câmpului însuşi), sau a ceea ce fizicienii numesc o valoare medie pe vid nenulă.

ca melasa. Interacțiile particulei cu câmpul se manifestă ca o rezistență față de accelerarea ei.*

Nu vă sună oarecum familiar?

Masa inerțială a unui corp este o măsură a rezistenței sale la accelerare. Instinctul ne spune să echivalăm masa inerțială

---

* Observați că mişcarea accelerată este cea care e împiedicată. Particulele care se mişcă cu viteză constantă nu sunt afectate de câmpul Higgs. Din acest motiv, câmpul Higgs nu intră în contradicție cu teoria restrânsă a relativității a lui Einstein. (*N. a.*)

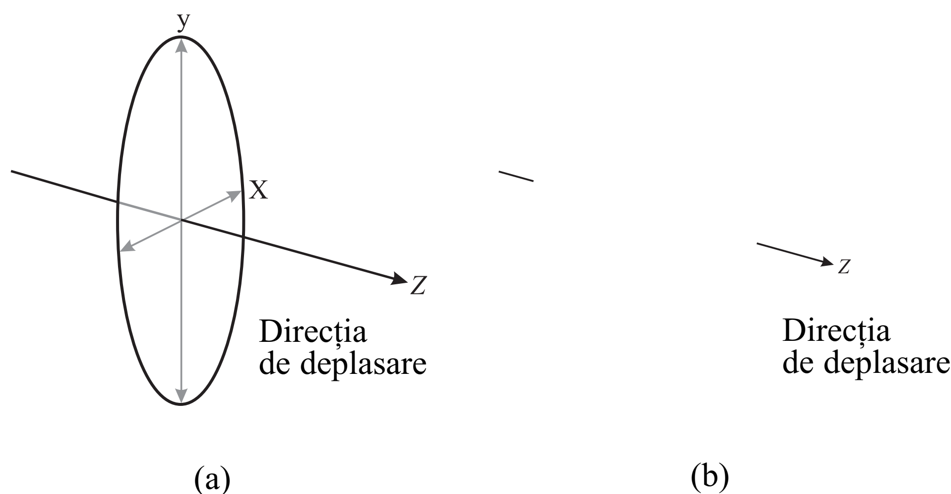


Figura 14. Un boson fără masă se deplasează cu viteza luminii şi are doar două „grade de libertate“ transversale, stânga/dreapta (*x*) şi sus/jos (*y*). Când interacționează cu câmpul Higgs, particula poate absorbi un boson Nambu–Goldstone fără masă, dobândind un al treilea grad de libertate – înainte/înapoi (*z*). În consecință, particula capătă „adâncime“ şi este încetinită. Această rezistență la accelerare constituie masa particulei.

cu cantitatea de substanță pe care o are corpul. Cu cât conține corpul mai multă „materie“, cu atât este el mai greu de accelerat. Mecanismul Higgs inversează această logică. *Acum interpretăm ca masă (inerțială) a particulei gradul în care câmpul Higgs se opune accelerării particulei*.

Conceptul de masă a dispărut printr-un simplu joc al logicii. El a fost înlocuit prin interacțiile dintre particulele care altminteri nu ar avea masă şi câmpul Higgs.

Mecanismul Higgs nu a câştigat imediat adepți. Higgs însuşi s-a lovit de dificultăți în publicarea articolului. El l-a trimis inițial revistei europene *Physics Letters*, în iulie 1964, dar a fost respins de editor, pe motiv că e „inadecvat“. După mai mulți ani, Higgs avea să scrie[7]:

> Am fost indignat. Credeam că ceea ce arătasem putea avea consecințe importante în fizica particulelor. Mai târziu, cole-

gul meu Squires, care a petrecut luna august 1964 la CERN, mi-a spus că teoreticienii de acolo n-au înțeles esența lucrării mele. Privind în urmă, acest lucru nu e surprinzător: în 1964 [...] teoria cuantică a câmpului nu mai era la modă [...].

Higgs a făcut câteva modificări în articol şi l-a trimis revistei *Physical Review Letters*. Lucrarea i-a fost trimisă lui Nambu pentru referatul de specialitate. Nambu i-a cerut lui Higgs să spună care era relația dintre articolul său şi un articol al lui Brout şi Englert, care tocmai fusese publicat în aceeaşi revistă (pe 31 august 1964). Higgs nu ştiuse de lucrarea lui Brout şi Englert pe aceeaşi temă, şi a citat articolul lor într-o notă de subsol suplimentară. El a adăugat, de asemenea, un paragraf final la textul articolului, în care atrăgea atenția asupra posibilității unor „multipleți incompleți de bosoni scalari şi vectoriali"[8], o referire destul de obscură la posibilitatea existenței unui alt boson masiv de spin zero, particula cuantică a câmpului Higgs.

Acesta avea să fie cunoscut ca bosonul Higgs.

În mod surprinzător poate, mecanismul Higgs a avut un impact imediat slab asupra celor care ar fi avut cel mai mult de câştigat de pe urma lui.

*

Higgs s-a născut la Newcastle pe Tyne, în Anglia, în anul 1929. În 1950 a absolvit fizica la King's College, Londra, şi şi-a luat doctoratul patru ani mai târziu. Au urmat perioade petrecute la Universitatea din Edinburgh, la Universitatea din Londra şi la Imperial College. A revenit la Universitatea din Edinburgh în 1960, pentru a ocupa un post de lector de fizică matematică. S-a căsătorit în 1963 cu Jody Williamson, o colegă activistă în campania pentru dezarmare nucleară.

În august 1965, Higgs a plecat împreună cu Jody la Chapel Hill, pentru o perioadă sabatică la Universitatea din Carolina de Nord. Primul lor fiu, Christopher, s-a născut peste câteva luni. Puțin după aceea, Higgs a primit de la Freeman Dyson invitația

de a prezenta un seminar despre mecanismul Higgs la Institutul de Studii Avansate de la Princeton. Higgs era îngrijorat în privința felului în care avea să fie primită teoria sa într-un loc renumit pentru seminarele dure, „cu puşca la picior“, dar, când a ținut seminarul, în martie 1966, a scăpat teafăr. Pauli murise în decembrie 1958, însă ne putem întreba dacă argumentele lui Higgs i-ar fi schimbat atitudinea față de nefericita pledoarie a lui Yang, din urmă cu mai bine de doisprezece ani.

Higgs a profitat de ocazie pentru a răspunde unei cereri mai vechi de a susține un seminar la Universitatea Harvard, iar a doua zi a plecat într-acolo. Publicul a fost la fel de sceptic, un teoretician de la Harvard recunoscând mai târziu că „abia aşteptau să-l facă bucăți pe acest idiot care credea că poate ocoli teorema lui Goldstone“[9].

Glashow era în sală, dar se pare că pe atunci uitase cu totul de tentativele lui mai vechi de a obține o teorie unificată electroslabă, teorie care să prezică masele particulelor W^+, W^- şi Z^0, care trebuiau cumva să fie masive. „Amnezia lui a persistat din păcate tot anul 1966“, avea să spună Higgs.[10] Ca să fim drepți cu Glashow, Higgs era preocupat de aplicarea mecanismului său în cazul forței tari.

Dar Glashow n-a reuşit să coreleze cele două lucruri. Fostul său coleg de liceu Steven Weinberg (şi, independent, Abdus Salam) vor fi aceia care vor face în cele din urmă legătura.

După obținerea unei licențe la Universitatea Cornell în 1954, Weinberg îşi începuse studiile de masterat la Institutul Niels Bohr din Copenhaga, revenind la Universitatea Princeton în 1957 pentru terminarea doctoratului. El şi-a încheiat studiile postdoctorale la Universitatea Columbia din New York şi la Laboratorul de Radiații Lawrence din California, pentu a obține apoi un post de profesor la Universitatea din Berkeley, California. În 1966 şi-a luat o vacanță pentru merge ca lector invitat la Harvard, iar în anul următor a devenit profesor invitat la MIT.

Weinberg îşi petrecuse cei doi ani anteriori ocupându-se de efectele ruperii spontane a simetriei în interacțiile prin forța tare descrise de o teorie de câmp SU(2)×SU(2). Aşa cum descoperiseră cu câțiva ani înainte Nambu şi Jona-Lasinio, rezultatul ruperii spontane a simetriei este faptul că protonii şi neutronii capătă masă. Weinberg credea că bosonii Nambu–Goldstone astfel creați ar putea fi aproximați prin pioni. La acea vreme, toate acestea păreau să aibă sens şi, departe de a încerca să ocolească teorema Goldstone, el a privit în mod cert cu bucurie particulele suplimentare prezise.

Dar acum Weinberg şi-a dat seama că această abordare nu putea fi rodnică şi i-a venit brusc o altă idee[11]:

> La un moment dat în toamna lui 1967, cred că în timp ce conduceam maşina spre biroul meu de la MIT, am înțeles dintr-odată că aplicasem idei corecte într-o problemă greşită.

Weinberg aplicase mecanismul Higgs în cazul forței tari. El şi-a dat acum seama că structurile matematice pe care încercase să le aplice interacțiilor prin forța tare erau exact cele necesare pentru a rezolva problemele pe care le aveau interacțiile prin forța slabă şi bosonii masivi implicați în aceste interacții. „O, Doamne“, a exclamat el cu voce tare, „ăsta e răspunsul pentru interacțiile slabe!“[12]

Weinberg era pe deplin conştient că, dacă masele particulelor W^+, W^- şi Z^0 sunt puse cu mâna, ca în teoria de câmp electroslab SU(2)×U(1) a lui Glashow, atunci rezultatul va fi nerenormabil. El se întreba acum dacă nu cumva ruperea simetriei prin mecanismul Higgs ar înzestra particulele cu masă, ar elimina bosonii Nambu–Goldstone nedoriți şi ar produce o teorie care să fie în principiu renormabilă.

Rămânea problema curenților slabi neutri, interacții implicând particula neutră Z^0, pentru care nu exista încă nici o dovadă experimentală. Weinberg a hotărât să evite cu totul această problemă, restrângându-şi teoria la leptoni – electroni, miuoni şi

neutrini. El devenise între timp circumspect în privința hadronilor, particulele afectate de forța tare, şi mai ales în privința particulelor stranii, care constituiau principalul motiv pentru studiul experimental al interacțiilor prin forța slabă.

Curenții neutri erau în continuare prezişi, dar, într-un model care consta doar din leptoni, aceşti curenți ar implica neutrini. Neutrinul se dovedise încă de la început destul de greu de pus în evidență experimental, iar Weinberg şi-a imaginat pesemne că detectarea curenților neutri ai forței slabe care implică aceste particule pune probleme experimentale atât de grele, încât el îi poate prezice fără să se teamă prea mult că va fi contrazis.

Weinberg a publicat în noiembrie 1967 un articol care prezenta în detaliu teoria unificată electroslabă pentru leptoni. Aceasta era o teorie de câmp SU(2)×U(1) redusă la simetria U(1) obişnuită a electromagnetismului prin ruperea spontană a simetriei, care dădea masă particulelor W^+, W^- şi Z^0, în timp ce fotonul rămânea fără masă. El a estimat masele bosonilor forței slabe: aproximativ 85 de mase protonice pentru particulele W şi 96 de mase protonice pentru particula Z^0. N-a reuşit să demonstreze că teoria e renormabilă, dar era sigur că este.

În 1964, Higgs vorbise despre posibilitatea existenței unui boson Higgs, dar acest fapt nu era legat de vreo forță sau vreo teorie anume. În teoria sa electroslabă, Weinberg găsise că era necesar să introducă un câmp Higgs cu patru componente. Trei dintre acestea aveau să asigure masă pentru particulele W^+, W^- şi Z^0. A patra urma să fie o particulă fizică – bosonul Higgs. Ce fusese la început o posibilitate matematică devenise acum o predicție. Weinberg chiar a estimat mărimea cuplajului dintre bosonul Higgs şi electron. Bosonul Higgs a făcut un pas extrem de important înainte, devenind o particulă „reală“.

În Marea Britanie, Abdus Salam aflase de mecanismul Higgs de la Tom Kibble. El lucrase mai înainte la o teorie electroslabă de câmp SU(2)×U(1), şi a înțeles imediat posibilitatea oferită de ruperea spontană a simetriei. Când a văzut un preprint al

articolului lui Weinberg care aplica teoria în cazul leptonilor, şi-a dat seamă că el şi Weinberg ajunseseră în mod independent la exact acelaşi model. A hotărât să nu-şi publice lucrarea până nu va avea ocazia să includă în mod corect hadronii. Dar, deşi a încercat din răsputeri, n-a putut ocoli problema curenţilor neutri.

Atât Weinberg, cât şi Salam credeau că teoria este renormabilă, dar nici unul n-a putut demonstra asta. Şi nici n-au putut prezice masa bosonului Higgs.

*

Nimeni n-a dat prea mare importanţă acestor lucruri. Cei câţiva care le-au acordat o oarecare atenţie au fost de regulă critici. Problema masei fusese rezolvată printr-o „şmecherie“ care semăna confuzie, implicând un câmp ipotetic, care implica un alt boson ipotetic. Se părea că fizicienii teoriei cuantice a câmpului continuau să se joace cu câmpurile şi particulele, conform unor reguli obscure pe care puţini le înţelegeau.

Fizicienii particulişti i-au ignorat pur şi simplu şi au continuat să se ocupe de ştiinţa lor.

CAPITOLUL 5

Pot face asta!

În care Gerard 't Hooft demonstrează că teoriile de câmp Yang–Mills pot fi renormate, iar Murray Gell-Mann şi Harald Fritsch elaborează o teorie a forţei tari bazată pe culoarea cuarcilor.

Pe lângă absurdele sarcini electrice fracţionare, mai exista o mare problemă cu modelul cuarcilor. Fiind constituenţi ai „particulelor de materie", cum sunt protonii şi neutronii, cuarcii trebuiau să fie fermioni, cu spini semiîntregi. De aici rezulta, conform principiului lui Pauli, că hadronii nu puteau conţine mai mult de un cuarc în fiecare din stările cuantice posibile.

Dar, conform modelului cuarcilor, protonul trebuia să fie alcătuit din doi cuarci up şi un cuarc down. Era oarecum totuna cu a spune că un orbital atomic trebuie să conţină doi electroni cu spinul în sus şi unul cu spinul în jos. Acest lucru nu era însă posibil. Proprietăţile de simetrie ale funcţiei de undă îl interziceau. Puteau exista doar doi electroni, unul cu spinul în sus şi unul cu spinul în jos. Nu mai era loc pentru al treilea. La fel, dacă cuarcii erau fermioni, nu era loc pentru doi cuarci up în proton.*

Această problemă fusese identificată la scurt timp după publicarea de către Gell-Mann a primului său articol despre cuarci. Fizicianul Oscar Greenberg a sugerat în 1964 că în realitate cuarcii ar putea fi *parafermioni*, ceea ce însemna că ei ar

---

* De fapt, cuarcii legaţi în hadroni se mai disting şi prin numărul cuantic de spin, ceea ce face ca, în cazul protonului, cei trei cuarci să poate fi în stări diferite, aşa cum cere principiul lui Pauli. Problema semnalată în carte există însă în cazul altui hadron, aşa-numita particulă omega, al cărei spin total cere ca cei trei cuarci să aibă spinii „în sus". (*N. t.*)

putea să se distingă şi prin alte „grade de libertate“ în afara celui pentru care numerele cuantice erau up, down şi strange. Ca urmare, ar putea exista diferite tipuri de cuarci up, de exemplu. Câtă vreme erau de tipuri diferite, doi cuarci up puteau sta foarte bine unul lângă altul într-un proton, fără să ocupe aceeaşi stare cuantică.

Dar existau probleme şi cu acest model. Soluția lui Greenberg făcea posibil ca barionii să se comporte ca bosonii, condensându-se într-o singură stare macroscopică la fel ca un fascicul de lumină laser. Acest lucru nu era acceptabil.

Yoichiro Nambu a încercat o schemă similară, sugerând mai întâi că ar putea exista două, apoi trei tipuri diferite de cuarci up, down şi strange. Un tânăr student la masterat de la Universitatea Syracuse din New York, coreeanul Moo-Young Han, i-a scris în 1965 dezvoltând această idee. Împreună au redactat un articol care a fost publicat mai târziu în acel an.

Nu era însă o simplă generalizare a teoriei lui Gell-Mann privind cuarcii. Han şi Nambu au introdus un nou tip de „sarcină a cuarcului“, care era diferită de sarcina electrică. Cei doi cuarci up din proton se distingeau acum prin noua sarcină, evitând astfel încălcarea principiului de excluziune al lui Pauli. Ei au susținut că forța care ține cuarcii împreună în interiorul nucleonilor mai mari se bazează pe o simetrie locală SU(3), care nu trebuie confundată cu simetria globală SU(3) care stă la baza Căii cu opt brațe.

Ei au hotărât, de asemenea, să folosească această ocazie pentru a scăpa de sarcinile electrice fracționare, introducând în schimb în teoria cuarcilor nişte tripleți SU(3) suprapuşi, cu sarcini electrice egale cu +1, 0 şi –1, pe lângă noul tip de sarcină.

Nimeni nu le-a dat mare atenție. Han şi Nambu făcuseră un mare pas înainte către soluția finală, dar lumea nu era încă pregătită.

*

Glashow a revenit până la urmă, în 1970, la problemele teoriei sale de câmp SU(2)×U(1) a interacțiilor electroslabe, în

compania a doi cercetători postdoctorali de la Harvard, fizicianul grec John Iliopoulos şi italianul Luciano Maiani. Glashow îl întâlnise pentru prima oară pe Iliopoulos la CERN, şi fusese impresionat de eforturile lui de a găsi o cale pentru a renorma teoria de câmp a forţei slabe. Maiani a sosit la Harvard cu câteva idei ciudate despre intensitatea interacţiilor slabe. Toţi trei şi-au dat seama că preocupările lor erau convergente.

În acel moment nici unul dintre ei nu cunoştea articolul din 1967 al lui Weinberg, care aplica ruperea spontană a simetriei şi mecanismul Higgs într-o teorie electroslabă a leptonilor.

Glashow, Iliopoulos şi Maiani au luat de la început lupta cu teoria. Dacă introduceau masele particulelor W^+, W^- şi Z^0 „cu mâna“ în teorie, atunci în ecuaţii apăreau divergenţe necontrolabile care făceau ca teoria să fie nerenormabilă. Mai era apoi problema curenţilor slabi neutri. De exemplu, teoria prezicea că un kaon neutru trebuie să se dezintegreze prin emisia unui boson Z^0, schimbând stranietatea particulei din proces şi producând doi miuoni – un curent slab neutru. Nu exista însă nici o dovadă experimentală privind acest mod de dezintegrare. În loc să abandoneze cu totul bosonul Z^0, fizicienii au încercat să înţeleagă de ce acest mod particular ar putea fi interzis.

Neutrinul miuonic fusese descoperit în 1962, ca al patrulea lepton alături de electron, neutrinul electronic şi miuon. Fizicienii au început să ajusteze modelul cu trei cuarci şi patru leptoni, adăugând iniţial mai mulţi leptoni. Dar Glashow publicase deja un articol în 1964, speculând asupra existenţei posibile a unui al patrulea cuarc, pe care l-a numit cuarcul charm.* Această soluţie părea mai rezonabilă. Natura doreşte cu siguranţă un echilibru între numărul leptonilor şi numărul cuarcilor. Un model cu patru leptoni şi patru cuarci avea o simetrie mult mai plăcută.

---

* Am păstrat numele originale din engleză pentru cuarci (up, down, charm, strange), cu prescurtările consacrate (u, d, c, s). Pentru hadroni, vom utiliza uneori versiunile în română, de pildă mezoni cu stranietate sau cu farmec (traducerea lui *charm*). (*N. t.*)

Teoreticienii au introdus în joc un al patrulea cuarc, o versiune mai grea a cuarcului up cu sarcina +2/3. Ei şi-au dat seama că astfel eliminau cu totul curenţii slabi neutri.

Curenţii slabi neutri pot să apară prin dezintegrări care-l implică pe Z^0 sau prin dezintegrări mai complexe, care implică emisia celor două particule W^+ şi W^-. În ambele cazuri rezultatul final e acelaşi – doi miuoni cu sarcini electrice opuse, μ^+ şi μ^-. Cea de-a doua cale de dezintegrare e reprezentată în figura 15(a). Aici, un kaon neutru (prezentat ca o combinaţie de cuarci down şi anti-strange) emite o particulă W^- virtuală, iar cuarcul down (cu sarcina –1/3) se transformă într-un cuarc up (cu sarcina +2/3). Particula virtuală W^- se dezintegrează într-un miuon şi un antineutrin miuonic.

Cuarcul up care rezultă se poate presupune apoi că emite o particulă W^+ virtuală, transformându-se într-un cuarc strange. Particula W^+ se dezintegrează într-un miuon pozitiv şi un neutrin miuonic. Acest proces este interpretat ca o „contribuţie a unei bucle“ la rezultatul total, care implică dezintegrarea unui kaon neutru într-un miuon încărcat pozitiv şi unul încărcat negativ.

Nu exista, în principiu, nici un motiv pentru care acest exemplu de curent neutru să nu fie observat. Totuşi, modurile de dezintegrare comune ale kaonilor neutri produc pioni, nu miuoni. Calea de dezintegrare în miuoni era cumva blocată. Glashow, Iliopoulos şi Maiani au înţeles că un mod de dezintegrare perfect analog implicând cuarcul charm ar conduce la rezultatul dorit – figura 15 (b). O diferenţă de semn în contribuţiile celor două moduri de dezintegrare posibile înseamnă că practic ele se anihilează reciproc. Prins ca un iepure în lumina farurilor, kaonul neutru nu se poate decide în ce parte să sară, până e prea târziu.

Era o soluţie ingenioasă. Kaonii, principala bază pentru studiile experimentale ale interacţiilor slabe care ar fi putut fi mediate prin curenţi neutri, nu se dezintegrau aproape niciodată aşa din cauza modurilor de dezintegrare alternative care implicau cuarcul charm.

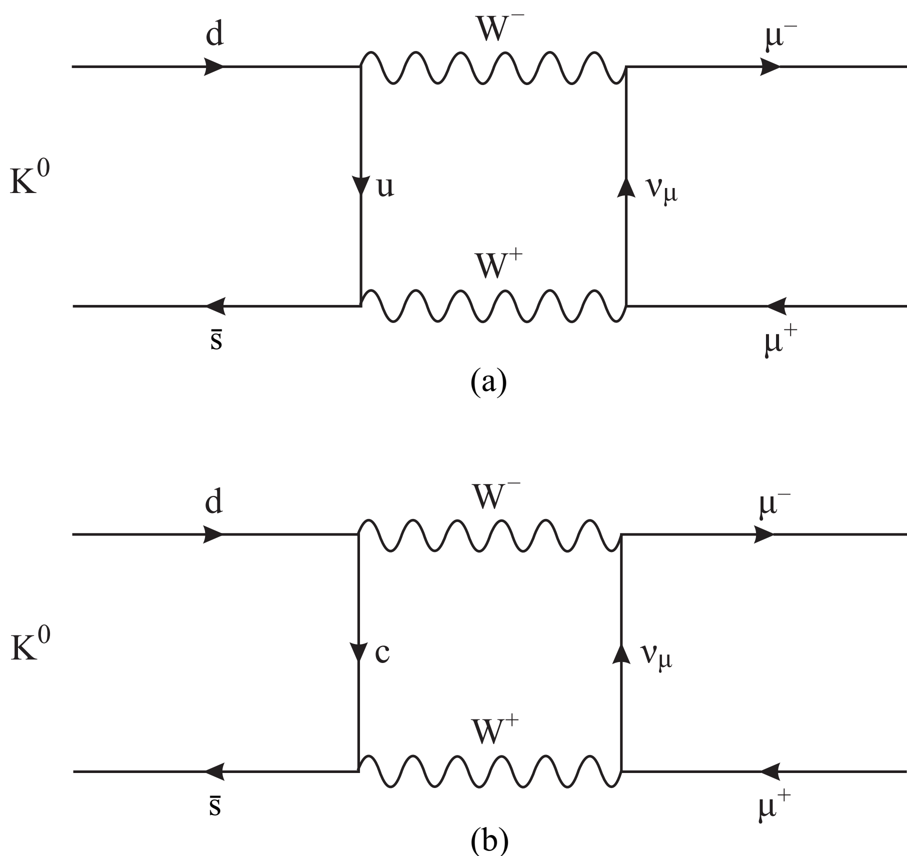


Figura 15. (a) Un kaon neutru se dezintegrează în doi miuoni printr-un mecanism complicat care implică emisia particulelor W^+ și W^-. Nu există o schimbare netă a sarcinii, deci acesta este un curent slab neutru. (b) Calea de dezintegrare definită în (a) este compensată de această cale de dezintegrare alternativă care implică cuarcul *charm* (notat aici prin c).

Entuziasmați de descoperirea lor, cei trei fizicieni s-au înghesuit într-o maşină şi au plecat spre MIT ca să-l întâlnească pe fizicianul american Francis Low, care se ocupase şi el de această problemă. Weinberg li s-a alăturat, iar împreună au discutat despre avantajele acestui nou mecanism Glashow–Iliopoulos–Maiani (GIM).

Ce a urmat a fost o extraordinară lipsă de comunicare.

Aproape toate ingredientele unei teorii unificate a forțelor slabă şi electromagnetică erau reunite în mințile teoreticienilor

adunați în biroul lui Low. Weinberg înțelesese cum să aplice ruperea spontană a simetriei folosind mecanismul Higgs într-o teorie de câmp SU(2)×U(1) pentru leptoni, permițând ca masele particulelor să fie calculate în loc să fie puse de la început cu mâna. Glashow, Iliopoulos şi Maiani găsiseră o soluție posibilă pentru problema curenților slabi neutri în dezintegrările particulelor cu stranietate şi ofereau promisiunea că teoria SU(2)×U(1) ar putea fi extinsă la interacțiile slabe care implică hadroni. Dar ei mai trebuiau încă să precizeze masele particulelor de câmp şi se luptau cu divergențele.

Glashow, Iliopoulos şi Maiani nu ştiau nimic despre lucrarea lui Weinberg din 1967, iar Weinberg n-a spus nimic despre ea. El a mărturisit mai târziu că avea „un blocaj psihologic“ legat de lucrările lui anterioare, în special cele despre demonstrarea faptului că teoria electroslabă ar putea fi renormată.[1] În acelaşi timp, el nu a primit cu bunăvoință propunerea privind cuarcul charm. Glashow, Iliopoulos şi Maiani nu vorbeau doar despre o particulă nouă, parte a unei familii extinse de particule cu o relevanță pesemne dubioasă, ci despre o întreagă nouă colecție de barioni şi mezoni „cu farmec“. Dacă cuarcul charm exista, atunci Calea cu opt brațe era doar o submulțime a unei reprezentări mult mai vaste, conținând numeroşi membri „cu farmec“.

Erau cam prea multe de înghițit numai pentru a explica *absența* curenților slabi neutri în dezintegrările particulelor stranii. „Desigur, nu toată lumea credea în existența hadronilor cu farmec pe care noi îi preziceam“, a spus Glashow.[2]

*

Nu putea fi vorba de vreun progres înainte ca cineva să demonstreze că teoria electroslabă Weinberg–Salam putea fi renormată.

Teoreticianul olandez Martinus Veltman studiase matematica la Universitatea de Stat din Utrecht, ajungând profesor acolo în 1966. El a început să se ocupe de problema renormării teoriilor de câmp Yang–Mills în 1968.

Fizica energiilor înalte nu era un domeniu abordat de mulți cercetători în Olanda. Aceasta a dus la o oarecare senzație de izolare. Dar ea se potrivea cu scopurile lui Veltman, fiindcă însemna că nu trebuia să se justifice pentru alegerea unui subiect de cercetare în afara modei.

La începutul lui 1969 el a primit un tânăr student, Gerard ’t Hooft, care își definitiva o teză predoctorală (numită în mod colocvial în Olanda *scriptie*). Veltman a ezitat să-l implice pe tânărul său student în cercetările asupra teoriilor Yang–Mills, deoarece considera că subiectul e prea riscant și avea puține șanse să conducă la un post bine plătit. Dar, după ce și-a terminat cu succes teza predoctorală, lui ’t Hooft i s-a oferit un post la universitate, așa încât și-a putut continua studiile doctorale. ’t Hooft și-a exprimat dorința de a continua să lucreze cu Veltman.

Veltman tot mai considera că teoriile Yang–Mills erau pline de pericole. El făcuse câteva progrese considerabile în privința renormării, însă problema era extrem de greu de tratat. Dar ’t Hooft credea cu tărie că ea se va dovedi o bază fertilă pentru teza lui de doctorat. Veltman a sugerat inițial un subiect diferit, dar ’t Hooft nu s-a lăsat convins.

Cei doi formau o pereche neobișnuită. Veltman era un tip cu personalitate puternică, tranșant, mândru de realizările sale, deși indiferent față de lipsa generală de interes din partea comunității fizicienilor. ’t Hooft avea o constituție fragilă și era mai degrabă timid, modestia lui ascunzând o minte deosebit de ascuțită.

În cartea sa din 1997 intitulată *In Search of the Ultimate Building Blocks* (*În căutarea constituenților fundamentali*), ’t Hooft îl va prezenta pe Veltman printr-o anecdotă. Într-o bună zi, Veltman a intrat într-un ascensor care era deja plin. Când butonul a fost apăsat, sistemul de alarmă al ascensorului a avertizat că era prea încărcat. Toți ochii s-au întors spre Veltman, care era destul de corpolent și, în plus, intrase printre ultimii. Dar,

în timp ce alții ar fi mormăit jenați o scuză și ar fi ieșit din lift, Veltman nu se clintea din loc. El cunoștea principiul de echivalență al lui Einstein, care stă la baza teoriei generale a relativității – dacă un om cade liber, greutatea lui nu se mai simte. Știa ce trebuie să facă.

„Când spun «acum» apăsați pe buton!" a exclamat el.[3]

Apoi și-a făcut vânt și a sărit în aer. „Acum!" a strigat el.

Cineva a apăsat pe buton și ascensorul a început să urce. Când Veltman a revenit pe podea, ascensorul avea deja o viteză suficientă pentru a-și continua urcarea. 't Hooft se afla în acel ascensor.

Într-o zi din toamna sau iarna lui 1970, Veltman și 't Hooft se plimbau printre clădirile campusului universitar.

— Nu-mi pasă ce și cum, i-a spus Veltman studentului său, dar trebuie să avem cel puțin o teorie renormabilă cu bosoni vectoriali încărcați masivi, și dacă ea seamănă sau nu cu natura nu contează, [acestea] sunt detalii care vor fi aranjate ulterior de vreun fanatic al modelelor. Oricum, toate modelele posibile au fost deja publicate.[4]

— Pot face asta, a spus calm 't Hooft.

Știind foarte bine cât de grea era problema și că alții – de talia lui Richard Feynman – încercaseră și dăduseră greș, Veltman a fost extrem de surprins de afirmația lui 't Hooft.

— Ce spui? a întrebat el.

— Pot face asta, a repetat 't Hooft.

Veltman lucrase la această problemă atât de mult timp, încât pur și simplu nu putea crede că soluția era atât de ușoară pe cât își închipuia 't Hooft. Era, pe bună dreptate, sceptic.

— Pune totul pe hârtie și o să vedem, a zis el.

Dar 't Hooft aflase despre ruperea spontană a simetriei la o școală de vară organizată la Cargèse, Corsica, în 1970. La sfârșitul lui 1970 el arătase în primul său articol că teoriile de câmp Yang–Mills care conțin particule fără masă pot fi renormate. 't Hooft era sigur că ruperea spontană a simetriei va face

ca şi teoriile de câmp Yang–Mills cu particule masive să fie renormabile.

În scurt timp scurt el a pus într-adevăr totul pe hârtie.

Pe Veltman îl nemulțumea faptul că ’t Hooft folosise mecanismul Higgs. Era mai ales îngrijorat de faptul că prezența unui câmp Higgs de fond, care umple întregul univers, ar trebui să se manifeste prin efecte gravitaționale.*

Aşa că au discutat în contradictoriu o vreme. În cele din urmă, ’t Hooft a hotărât să-i dea conducătorului său de teză rezultatele calculelor lui teoretice, fără a arăta explicit de unde proveneau ele. Veltman ştia foarte bine de unde, dar s-a mulțumit să verifice doar corectitudinea rezultatelor lui ’t Hooft.

În urmă cu câțiva ani Veltman elaborase o nouă metodă de a efectua calcule algebrice complexe folosind un program pe care l-a numit Schoonschip, „vapor curat“ în olandeză.** Era unul dintre primele sisteme algebrice pe computer, care putea opera cu ecuații matematice în formă simbolică. Veltman a luat cu el la Geneva rezultatele lui ’t Hooft pentru a le verifica pe un calculator de la CERN.

Veltman era tulburat, dar rămânea sceptic. Uitându-se peste rezultate în timp ce-şi construia programul pe calculator, a hotărât să omită câțiva factori egali cu patru care apăreau în ecuațiile lui ’t Hooft, factori în mod evident legați de bosonul Higgs. Credea că factorii egali cu patru erau pur şi simplu greşiți. Şi-a construit programul şi l-a rulat fără aceşti factori.

Peste puțină vreme l-a sunat pe ’t Hooft şi a declarat: „Merge aproape bine. Ai doar câțiva factori de doi greşiți.“[5]

---

* Contribuind la constanta cosmologică, introdusă prima oară ca un termen „fără sens“ de Einstein în ecuațiile lui pentru câmpul gravitațional. În modelul lambda-CDM (*cold dark matter* = materie întunecată rece) al cosmologiei big bang, constanta cosmologică (lambda) controlează rata de expansiune a spațiului-timp. (*N. a.*)

** Expresie olandeză provenind din navigație, care înseamnă lămurirea unei situații încurcate. Veltman a afirmat ulterior că a ales acest nume pentru a enerva pe toată lumea, cu excepția olandezilor. (*N. a.*)

’t Hooft nu făcuse nici o greşeală. „Atunci el şi-a dat seama că şi factorul egal cu patru era corect“, a explicat ’t Hooft, „şi că toate divergenţele se anulau în mod miraculos. În acel moment era la fel de entuziasmat de asta pe cât fusesem şi eu.“

’t Hooft reconstruise, absolut independent (şi printr-o pură coincidenţă), teoria de câmp bazată pe simetria SU(2)×U(1) ruptă pe care Weinberg o elaborase în 1967, şi arătase cum poate fi ea renormată. El se gândise să aplice teoria de câmp forţei tari, dar când Veltman l-a întrebat pe un coleg de la CERN dacă cunoştea vreo altă aplicaţie a unei teorii SU(2)×U(1), el a fost îndrumat către articolul lui Weinberg. Veltman şi ’t Hooft au înţeles că elaboraseră o teorie cuantică de câmp complet renormabilă a interacţiilor electroslabe.

Era o mare realizare. „[…] efectul psihologic al unei demonstraţii complete a renormabilităţii a fost imens“, avea să scrie Veltman peste câţiva ani.[6] De fapt,’t Hooft reuşise să demonstreze că teoriile de etalonare Yang–Mills sunt renormabile în general. Teoriile cu simetrie de etalonare locală reprezintă într-adevăr singura clasă de teorii de câmp care pot fi renormate.

’t Hooft avea doar 25 de ani. Iniţial, Glashow n-a înţeles demonstraţia. El a spus despre ’t Hooft: „Ori tipul e complet idiot, ori e cel mai mare geniu apărut în fizică după mulţi ani.“[7] Weinberg n-a crezut, dar când a văzut că un coleg teoretician o lua în serios, a hotărât să se uite mai atent la lucrarea lui ’t Hooft. A fost repede convins.

’t Hooft a primit un post de profesor asistent la Utrecht.

Acum *toate* ingredientele erau disponibile. Exista o teorie de câmp cu simetria SU(2)×U(1) spontan ruptă, renormabilă, a interacţiilor slabă şi electromagnetică. Masele bosonilor W şi Z^0 rezultau în mod „natural“ din aplicarea mecanismului Higgs. Câteva anomalii rămâneau, dar ’t Hooft precizase în articolul său, într-o notă de subsol, că acestea nu făceau teoria nerenormabilă. „Desigur“, avea să scrie el după câţiva ani, „afirmaţia trebuia interpretată în sensul că renormabilitatea se poate

restabili adăugând numere convenabile din diversele tipuri de fermioni (cuarci), dar recunosc că mă gândeam şi că poate acest lucru nu e necesar.“[8]

Anomaliile care rămâneau au putut fi eliminate adăugând mai mulți cuarci modelului.

*

Ce speranțe erau acum pentru o teorie de câmp a forței tari?

Gell-Mann primise Premiul Nobel pentru fizică pe 1969 pentru numeroasele sale contribuții, în special pentru descoperirea stranietății şi a Căii cu opt brațe. Realizările sale au fost trecute în revistă în discursul oficial ținut de Ivar Waller, membru al Comitetului Nobel pentru fizică. Waller a menționat şi cuarcii, explicând că, deşi căutați cu asiduitate, ei nu fuseseră descoperiți. El a recunoscut cu eleganță că totuşi cuarcii erau de o mare valoare „euristică“.

Gell-Mann trebuia acum să facă față statutului de celebritate acordat laureaților Nobel. Copleşit de cereri de a participa la reuniuni şi de a publica articole, a constatat că procesul de redactare, pe care îl găsise întotdeauna dificil, devenise acum imposibil. El a ratat chiar şi termenul-limită pentru publicarea propriei sale conferințe Nobel în volumul *Le prix Nobel* al Academiei Suedeze.* A fost unul dintre numeroasele termene-limită ratate.

În vara lui 1970, s-a retras cu familia la Aspen, în Colorado. Dar era o sustragere de la obligațiile formale, nu de la fizică. Ei şi-au petrecut vacanța împreună cu familiile altor fizicieni pe domeniile Centrului Aspen pentru Fizică.

Centrul era conceput ca un loc de retragere pentru laureații Nobel care doreau să lucreze în linişte. Fusese creat în 1962 de Institutul Aspen pentru Studii Umaniste, la propunerea a doi

* Website-ul Nobelprize.org menționează sec că: „Profesorul Gell-Mann şi-a prezentat conferința Nobel [pe 11 decembrie 1969], dar nu a trimis un manuscris pentru a fi inclus în acest volum.“ (*N. a.*)

fizicieni. Ideea lor a fost să ofere un mediu liniştit, relaxat, informal, unde fizicienii să scape de obligaţiile administrative ale posturilor lor academice de rutină şi doar să discute fizică între ei. Institutul cedase o parte din campusul său de pe pajiştile din Aspen, în mijlocul unui crâng de plopi de la marginea oraşului.

La Aspen l-a întâlnit Gell-Mann pe Harald Fritzsch, un fervent adept al modelului cuarcilor, care a fost uimit să descopere că Gell-Mann avea o atitudine ciudat de ambiguă în privinţa propriei sale creaţii „matematice“.

Fritzsch se născuse la Zwickau, la sud de Leipzig, în Germania de Est. Împreună cu un coleg, fugise din Germania comunistă, scăpând de autorităţile din Bulgaria într-un caiac echipat cu un motor extern. Ei navigaseră vreo 300 km pe Marea Neagră, până în Turcia.

Fritzsch începuse un doctorat în fizică teoretică la Institutul de Fizică şi Astrofizică din München, în Germania de Vest, unde unul dintre profesori era Heisenberg. În vara lui 1970, a trecut prin Aspen în drum spre California.

Ca student în Germania de Est, Fritzsch se convinsese de faptul că cuarcii trebuie să stea la baza unei teorii cuantice de câmp a forţei nucleare tari. Aceste obiecte erau mult mai mult decât nişte instrumente matematice. Cuarcii erau reali.

Gell-Mann a fost impresionat de entuziasmul tânărului german şi a fost de acord ca Fritzsch să vină la el la Caltech cam o dată pe lună. Împreună, ei au început să lucreze la o teorie de câmp construită din cuarci. Când Fritzsch şi-a terminat studiile doctorale în Germania de Vest la începutul lui 1971, el s-a transferat la Caltech.

Fritzsch declanşase un mic cutremur, zdruncinând bazele atitudinii conservatoare a lui Gell-Mann faţă de cuarci. A fost mult mai mult decât un simplu cutremur psihologic: sosirea lui Fritzsch la Caltech pe 9 februarie 1971 a coincis cu un cutremur real, care a lovit în acea dimineaţă valea San Fernando în apropiere de Sylmar, cu o magnitudine de 6,6 pe scara Richter. „În amintirea acelui moment“, avea să scrie mai târziu Gell-Mann,

„am lăsat tablourile de pe pereți să atârne strâmb, până când au fost perturbate din nou de cutremurul din 1987.“[9]

Gell-Mann a obținut finanțări pentru el și pentru Fritzsch, iar în toamna lui 1971 s-au dus împreună la CERN. Acolo au aflat de la William Bardeen (fiul lui John Bardeen, cel cu teoria BCS a supraconductibilității) despre existența unor anomalii în calculul ratelor de dezintegrare a pionilor neutri. Bardeen petrecuse un timp la Princeton, lucrând cu Stephen Adler la acest calcul. Ei arătaseră că modelul cuarcilor cu sarcini fracționare prezicea o rată de dezintegrare care era cu un factor de trei mai mică decât valoarea măsurată experimental. Adler mersese mai departe, arătând că modelul Han–Nambu al cuarcilor cu sarcini întregi era mai bun în prezicerea ratelor măsurate.

Gell-Mann, Fritzsch și Bardeen lucrau acum împreună pentru a explora diversele posibilități. Ei voiau să vadă dacă era posibil să pună de acord rezultatele privind dezintegrarea pionului neutru în doi fotoni cu o variantă a modelului inițial al cuarcilor cu sarcini fracționare.

După cum sugeraseră Han și Nambu, ei aveau nevoie de un nou număr cuantic. Gell-Mann a hotărât să numească acest nou număr cuantic „culoare“. În noua schemă, cuarcii aveau trei numere cuantice de culoare posibile: albastru, roșu și verde.*

Barionii ar fi alcătuiți din trei cuarci de culori diferite, astfel încât sarcina lor „de culoare“ totală să fie zero, iar rezultatul să fie „alb“. De exemplu, ne putem imagina că un proton constă dintr-un cuarc up albastru, un cuarc up roșu și un cuarc down verde ($u_a u_r d_v$). Un neutron va consta dintr-un cuarc up albastru, un cuarc down roșu și un cuarc down verde ($u_a d_r d_v$). Am putea

---

* În schema lor inițială, Gell-Mann, Fritzsch și Bardeen le-au numit roșu, alb și albastru (inspirați de steagul național francez). S-a văzut însă curând că roșu, verde și albastru era o alegere mai bună, deoarece, atunci când sunt amestecate, produc culoarea albă (deși, strict vorbind, culorile primare care produc alb prin combinare sunt roșu, galben și albastru). Pentru a evita orice confuzie am adoptat de la început terminologia acceptată în prezent. (*N. t.*)

considera că mezonii, de pildă pionii şi kaonii, sunt compuşi din cuarci coloraţi şi anticuarcii corespunzători cu anticuloare, astfel încât sarcina de culoare totală să fie zero, iar particulele să fie, de asemenea, „albe".

Era o soluţie elegantă. Diversele culori ale cuarcilor constituiau un grad de libertate suplimentar şi făceau ca principiul de excluziune al lui Pauli să nu mai fie încălcat. Triplând numărul diferitelor tipuri de cuarci, rata de dezintegrare a pionului neutru era acum prezisă cu precizie. Şi nimeni nu se putea aştepta să vadă sarcina de culoare dezvăluită în experimente, întrucât aceasta e o proprietate a cuarcilor, iar cuarcii sunt „închişi" în interiorul hadronilor de culoare albă. Culoarea nu poate fi văzută, deoarece natura cere ca toate particulele observabile să fie albe.

„Ne-am dat seama treptat că acea variabilă [culoarea] făcea totul pentru noi!" a explicat Gell-Mann. „Ea rezolva problema statisticii şi putea face asta fără să ne oblige să apelăm la noi particule dubioase. Apoi ne-am dat seama că ea putea stabili şi dinamica, deoarece am putut construi pe baza ei o teorie de etalonare SU(3), o teorie Yang–Mills."[10]

Până în septembrie 1972, Gell-Mann şi Fritzsch elaboraseră un model care consta din trei particule încărcate cu sarcină electrică fracţionară, care puteau apărea în trei „arome" – up, down şi strange – şi trei culori, legate între ele printr-un sistem de opt gluoni coloraţi, purtătorii „forţei de culoare" tari. Gell-Mann a prezentat modelul la o conferinţă de fizica energiilor înalte organizată pentru a marca inaugurarea Laboratorului Naţional de Acceleratoare din Chicago.

Dar el începea deja să aibă îndoieli. Preocupat din nou îndeosebi de statutul cuarcilor şi de mecanismul prin care aceştia sunt în permanenţă captivi în interiorul hadronilor, Gell-Mann n-a făcut o propagandă prea zgomotoasă teoriei. A menţionat o variantă a modelului care avea doar un singur gluon. A insistat pe faptul că gluonii şi cuarcii erau „fictivi".

În momentul când el şi Fritzsch s-au apucat să redacteze textul conferinței, erau deja cuprinşi de îndoieli. „Când pregăteam varianta scrisă“, avea să spună el mai târziu, „eram din păcate tulburați de îndoielile pe care tocmai le-am menționat, şi de aceea ne-am refugiat în aspectele tehnice.“[11]

Această lipsă de curaj nu e prea greu de înțeles. Dacă cuarcii colorați erau în realitate menținuți permanent prizonieri înăuntrul barionilor şi mezonilor „albi“, astfel încât sarcinile lor electrice fracționare şi sarcinile de culoare nu puteau fi văzute niciodată, atunci se putea susține că toate speculațiile despre proprietățile lor erau neîntemeiate.

Teoreticienii erau acum foarte aproape de o mare sinteză: o combinație a teoriilor de câmp bazate pe o simetrie SU(3)×SU(2)×U(1) – ceea ce avea să devină aşa-numitul Model Standard. Era o sinteză care va pune bazele teoretice ale fizicii experimentale a particulelor pentru următorii treizeci de ani. Această ezitare a fost doar ca o inspirație adâncă înainte de saltul final.

De fapt, unele dovezi foarte atrăgătoare în favoarea existenței cuarcilor apăruseră exact cu câțiva ani în urmă din ciocnirile la energii înalte implicând electroni şi protoni. Rezultatele experimentelor efectuate la Centrul de Acceleratoare de la Stanford (SLAC) indicau în mod convingător că protonul e format din nişte constituenți care se comportă ca şi cum ar fi punctiformi.

Dar nu era clar că aceşti constituenți punctiformi erau cuarci. Ca situația să fie şi mai încurcată, rezultatele sugerau şi faptul că, departe de a fi ținuți strâns legați în interiorul protonului, constituenții se comportau ca şi cum ar fi complet liberi să hoinărească oriunde în interiorul încăpătoarelor lor gazde. Cum putea fi acest lucru compatibil cu ideea prizonieratului veşnic al cuarcilor?

Munca teoreticienilor era aproape încheiată. Modelul Standard era aproape gata. Venise rândul experimentatorilor.

PARTEA A II-A

Descoperirea

CAPITOLUL 6

Curenți neutri alternativi

În care se arată că protonii şi neutronii au o structură internă, iar curenții neutri ai forței nucleare slabe prezişi teoretic sunt găsiți, apoi pierduți, apoi găsiți din nou.

Razele cosmice produc ciocniri ale particulelor cu cea mai înaltă energie observată vreodată, mult mai înaltă uneori decât tot ce poate fi atins chiar şi în acceleratoarele de particule de astăzi.* Dar originea razelor e învăluită în mister, iar particulele şi energiile implicate în declanşarea acestor evenimente sunt necunoscute. Experimentele reuşite cu raze cosmice au la bază detectarea întâmplătoare a unor noi particule şi noi procese, detectare care se poate dovedi greu de repetat.

În ciuda succesului experimentelor cu raze cosmice în descoperirea pozitronului, a miuonului, a pionilor şi a kaonilor în cele două decenii dintre anii '30 şi începutul anilor '50, progresul în fizica particulelor a trebuit să aştepte apariția unor acceleratoare din ce în ce mai puternice, construite de oameni.

Primele acceleratoare au fost construite la sfârşitul anilor '20. Erau acceleratoare liniare, producând accelerarea electronilor sau a protonilor prin trecerea lor printr-o succesiune liniară de câmpuri electrice oscilante. Un asemenea accelerator

---

* Energiile particulelor din razele cosmice au valori tipice cuprinse între 10 MeV şi 10 GeV, dar foarte rar se înregistrează particule cu energii incredibil de înalte. Pe 15 octombrie 1991, în Utah a fost înregistrată o particulă din razele cosmice având o energie de aproximativ 300 milioane TeV. Numită particula „minune“ (*„Oh-My-God“ particle*), ea a fost interpretată ca fiind un proton accelerat până la viteze apropiate de viteza luminii. (*N. a.*)

a fost folosit în 1932 de John Cockroft şi Ernest Walton pentru a produce protoni de viteze înalte, care loveau apoi o țintă fixă, producând transmutația nucleelor-țintă în primele reacții nucleare induse artificial.*

Fizicianul american Ernest Lawrence a inventat în 1929 un model diferit de accelerator. Acesta folosea un magnet care făcea ca un fascicul de protoni să se mişte pe o spirală, în timp ce protonii erau accelerați la viteze din ce în ce mai înalte cu ajutorul unui câmp electric alternativ. El l-a numit *ciclotron*.

Lui Lawrence îi plăcea şi să impresioneze lumea, avea ambiții nemăsurate. A urmat un şir de aparate din ce în ce mai mari, culminând în 1939 cu proiectul unui super-ciclotron gargantuesc, având un magnet care cântărea 2000 de tone. Lawrence a estimat că acesta ar putea produce protoni cu energii de 100 milioane electronvolți (100 MeV), la pragul energiilor necesare pentru ca protonul să străbată nucleul. Lawrence s-a adresat Fundației Rockefeller, cerând sprijin financiar. Reverul lui a devenit brusc mai puternic atunci când, în toiul unei partide de tenis, a aflat vestea că tocmai primise Premiul Nobel pentru fizică pe 1939.

După izbucnirea războiului, tehnologia ciclotronului lui Lawrence a fost îndreptată spre problema separării unor cantități de uraniu 235 suficiente pentru a produce bomba atomică ce avea să fie aruncată la Hiroshima. Instalația Y-12 de separare electromagnetică a izotopilor, construită la Oak Ridge, în estul statului Tennessee, s-a bazat pe proiectul ciclotronului lui Lawrence.**

Magneții utilizați la Y-12 aveau 75 m lungime şi cântăreau între trei mii şi zece mii de tone. Construcția lor a epuizat

---

* Acestea erau numite în mod inexact experimente care „spărgeau atomul". (*N. a.*)

** Separarea electromagnetică nu a fost singura tehnică folosită. O instalație uriaşă de difuzie gazoasă (K-25) şi o instalație de difuzie termică au fost, de asemenea, construite la Oak Ridge. (*N. a.*)

rezerva de cupru a Americii, iar Trezoreria Statelor Unite a trebuit să împrumute proiectului Manhattan cincisprezece mii de tone de argint pentru a completa înfăşurările bobinelor. Magneții aveau nevoie de tot atâta putere cât un oraş mare şi erau aşa de puternici, încât lucrătorii puteau simți atracția magnetică asupra cuielor din pantofi. Femeile care se apropiau prea mult de magneți îşi pierdeau uneori agrafele din păr. Țevile erau trase din pereți. Treisprezece mii de oameni erau angajați pentru a se ocupa de instalație, care a intrat în funcțiune în noiembrie 1943.

Acesta a fost primul exemplu pentru ceea ce avea să se numească „ştiință la scară mare“.

Ciclotronul folosea un câmp magnetic de intensitate constantă şi un câmp electric de frecvență fixă, astfel încât avea o limită inerentă pentru energiile particulelor, de circa 1 000 MeV (sau 1 giga electronvolt, GeV). Pentru a atinge energii mai mari, este necesar ca particulele accelerate să se mişte pe o traiectorie circulară de-a lungul căreia atât câmpul electric, cât şi cel magnetic să varieze în mod sincronizat. Primele exemple de asemenea *sincrotroane* au fost bevatronul, un accelerator de 6,3 GeV, construit în 1950 la Laboratorul de Radiații de la Berkeley, California, şi cosmotronul, o maşină de 3,3 GeV construită în 1953 la Laboratorul Național Brookhaven din New York.

Alte țări au început să se implice şi ele. Pe 29 septembrie 1954, unsprezece state din Europa de Vest au ratificat o convenție pentru a înființa Consiliul European pentru Cercetări Nucleare (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, sau CERN).* După trei ani, un sincrotron de protoni de 10 GeV a fost inaugurat în Uniunea Sovietică de Institutul Unificat pentru

---

* Numele a fost schimbat în Organizația Europeană pentru Cercetări Nucleare (*Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*) când Consiliul provizoriu a fost dizolvat. Totuşi, s-a apreciat că acronimul OERN era mai puțin reuşit decât CERN, astfel că acronimul inițial a fost păstrat. (*N. a.*)

Cercetări Nucleare de la Dubna, la 120 km nord de Moscova. A urmat curând CERN-ul în 1959, cu un sincrotron de protoni de 26 GeV construit la Geneva.

Finanțarea fizicii energiilor înalte în America a crescut considerabil în timp ce cursa pentru supremație tehnologică din cadrul Războiului Rece a atins apogeul în anii ’60. Sincrotronul cu gradient alternativ, construit la Brookhaven în 1960, funcționa la energia de 33 GeV. Părea evident că dezvoltarea viitoare a fizicii particulelor se afla în mâinile proiectanților de sincrotroane, care împingeau tehnologia spre energii de ciocnire din ce în ce mai mari.

Astfel, când construcția unui nou accelerator *liniar* de electroni de 20 GeV, care costa 114 milioane de dolari, a început în 1962 la Universitatea Stanford din California, mulți fizicieni particuliști l-au respins ca pe o instalație irelevantă, capabilă doar de experimente de mâna a doua.

Dar câțiva fizicieni au recunoscut că accentul pus pe ciocnirile la energii tot mai mari ale hadronilor ajunsese să fie în detrimentul subtilității. Sincrotroanele erau folosite pentru a accelera protoni şi a-i izbi cu putere de nişte ținte fixe, care conțineau alți protoni. După cum explica Richard Feynman, ciocnirile proton–proton erau „ca şi cum am izbi unul de altul două ceasuri de buzunar pentru a vedea din ce sunt alcătuite“[1].

Centrul pentru Acceleratoare Liniare de la Stanford (SLAC) era construit pe 200 ha de pe terenurile Universității Stanford, la aproximativ 60 km la sud de San Francisco. El şi-a atins energia proiectată de 20 GeV pentru prima oară în 1967. Acceleratorul de trei kilometri este liniar în loc să fie circular, deoarece curbarea fasciculului de electroni până la un cerc folosind câmpuri magnetice intense duce la o pierdere mare de energie prin emisia radiației de sincrotron sub formă de raze X.

Când un electron se ciocneşte de un proton, pot să rezulte trei tipuri diferite de interacții. Electronul poate ricoşa pe proton într-un proces relativ inofensiv, schimbând un foton virtual,

modificând viteza şi direcția electronului, dar lăsând particulele intacte. Această împrăştiere, numită „elastică“, produce electroni cu energii finale relativ înalte, distribuite în jurul unui maxim.

Într-un al doilea tip de interacție, ciocnirea cu electronul poate implica schimbul unui foton virtual care face ca protonul să treacă într-una sau mai multe stări excitate. Electronul împrăştiat va avea în consecință mai puțină energie, iar un grafic al acestei energii în funcție de numărul de electroni prezintă o serie de maxime sau „rezonanțe“, care corespund diferitelor stări excitate ale protonului. O astfel de împrăştiere e „inelastică“, fiindcă pot fi create noi particule (de pildă, pionii), deşi atât electronul, cât şi protonul ies intacți din interacție. În esență, energia ciocnirii, ca şi cea a fotonului virtual schimbat, se consumă pentru crearea de noi particule.

Al treilea tip de interacție este aşa-numita ciocnire „profund inelastică“, în care o mare parte din energia electronului şi a fotonului virtual schimbat este folosită pentru a distruge complet protonul. Rezultă o puzderie de hadroni diferiți, iar electronul împrăştiat ricoşează, având acum o energie considerabil mai mică.

Studii de împrăştiere profund inelastică la unghiuri relativ mici pe o țintă de hidrogen lichid au început la SLAC în septembrie 1967. Ele au fost efectuate de un mic grup experimental din care făceau parte fizicienii Jerome Friedman şi Henry Kendall de la MIT şi fizicianul de origine canadiană Richard Taylor de la SLAC.

Ei şi-au concentrat atenția asupra dependenței unei mărimi numite „funcție de structură“ de diferența dintre energia inițială a electronului şi energia electronului împrăştiat. Această diferență e legată de energia fotonului virtual schimbat. S-a constatat că, pe măsură ce energia fotonului virtual creştea, funcția de structură prezenta maxime pronunțate corespunzând rezonanțelor presupuse ale protonului. Dar, atunci când energia a crescut mai mult, aceste maxime au făcut loc unui platou larg, fără

structură, care scădea treptat, pe măsură ce se extindea în zona ciocnirilor profund inelastice.

În mod straniu, forma funcției părea să fie în mare măsură independentă de energia inițială a electronului. Experimentatorii nu înțelegeau de ce.

Dar teoreticianul american James Bjorken a înțeles. Bjorken îşi luase doctoratul la Universitatea Stanford în 1959 şi se întorsese de curând în California, după o scurtă perioadă petrecută la Institutul Niels Bohr din Copenhaga. Exact înainte ca SLAC să fie terminat, el elaborase o metodă de a prezice rezultatele ciocnirilor electron–proton, folosind o abordare destul de ezoterică, bazată pe teoria cuantică a câmpului.

În acest model, era posibil ca protonul să fie văzut în două moduri diferite. El putea fi considerat o „bilă“ solidă de substanță materială, cu masa şi sarcina distribuite în mod uniform. Sau putea fi imaginat ca o regiune din spațiu în mare parte vidă, în care se află nişte constituenți discreți, punctiformi, încărcați cu sarcină electrică, la fel cum se arătase în 1911 că atomul este un spațiu vid conținând un nucleu minuscul, încărcat pozitiv.

Aceste două moduri foarte diferite de a imagina structura protonului produc rezultate de împrăştiere diferite. Bjorken înțelesese că electronii cu energie suficient de mare puteau pătrunde în interiorul unui proton „compus“ şi se puteau ciocni de constituenții lui punctiformi. În regiunea ciocnirilor profund inelastice, electronii vor fi împrăştiați în număr mai mare şi la unghiuri mai mari, iar funcția de structură se va comporta în modul care era acum pus în evidență de experimente.

Bjorken se abținuse să declare că aceşti constituenți punctiformi ar putea fi cuarcii. Modelul cuarcilor era încă privit cu neîncredere de comunitatea fizicienilor şi existau pe piață teorii alternative care erau mai bine văzute. Dispute privind interpretarea datelor au izbucnit chiar în interiorul grupului de fizicieni de la MIT–SLAC. În consecință, fizicienii nu s-au grăbit să declare rezultatele ca pe o dovadă a existenței cuarcilor.

Şi lucrurile au rămas aşa timp de alte zece luni.

Richard Feynman a vizitat SLAC în august 1968. După ce se ocupase de forţa nucleară slabă şi de aspecte ale gravitaţiei cuantice, el se hotărâse să-şi îndrepte din nou atenţia asupra fizicii energiilor înalte. Joan, sora lui, locuia într-o casă din apropierea instalaţiei de la SLAC şi, în timpul vizitelor la ea, el a avut ocazia să „dea o raită“ pe la SLAC ca să afle ce se mai întâmpla în domeniu.

A aflat astfel despre studiile grupului MIT–SLAC asupra împrăştierii profund inelastice. O a doua rundă de experimente era pe punctul de a începe, dar fizicienii încă îşi băteau capul cu interpretarea datelor din anul precedent.

Bjorken era plecat din oraş, dar noul său asociat postdoctoral de cercetare, Emmanuel Paschos, i-a vorbit lui Feynman despre comportamentul funcţiei de structură şi l-a întrebat ce crede despre asta. Când Feynman a văzut datele, a exclamat: „Toată viaţa am fost în căutarea unui experiment ca ăsta, care să poată testa o teorie de câmp a forţei tari!“[2] Şi a înţeles cum stăteau lucrurile în noaptea aceea, în camera lui de motel.

Comportamentul pe care îl văzuseră fizicienii de la MIT–SLAC, credea el, era legat de distribuţia după impulsuri a constituenţilor punctiformi aflaţi în profunzimea protonului. Feynman a numit aceşti constituenţi „partoni“ – adică „părţi ale protonului“ – pentru a evita să se încurce cu vreun model particular pentru interiorul protonului.*

„Am cu adevărat ceva să vă arăt, fraţilor“, le-a spus Feynman lui Friedman şi Kendall în dimineaţa următoare. „Am lămurit totul în camera mea de motel noaptea trecută!“[3] Bjorken ajunsese deja la majoritatea concluziilor pe care Feynman le-a expus acum, şi Feynman i-a recunoscut prioritatea. Dar, din nou,

---

* Gell-Mann n-a fost impresionat. El a numit partonii „*put-ons*“ adică „*particule puse cu mâna*“. Realitatea e că partonii nu sunt doar cuarci – ei pot fi sau cuarci, sau gluonii care transmit forţa de culoare de la un cuarc la altul. (*N. a.*)

Feynman descria fizica într-un mod mult mai simplu, şi totuşi mai viu, mai vizual. Când s-a întors la SLAC în octombrie 1968 pentru a ține o conferință despre modelul partonilor, atmosfera era incendiară. Nimic nu sporeşte mai mult încrederea într-o idee curajoasă decât susținerea ei entuziastă de către un laureat Nobel.

Erau partonii într-adevăr cuarci? Feynman nu ştia şi nu-i păsa de asta, dar Bjorken şi Paschos au creat rapid un model particular al partonilor bazat pe un triplet de cuarci.

Studiile ulterioare ale împrăştierii profund inelastice a electronilor pe neutroni, de la SLAC, şi rezultatele studiilor de împrăştiere a neutrinilor pe protoni, de la CERN, au furnizat dovezi suplimentare în sprijinul cuarcilor. La mijlocul anilor '70, cuarcii erau „prezenți" în mod oficial. Poate că fuseseră concepuți oarecum în glumă, ca un capriciu ciudat al naturii, dar făcuseră acum un pas decisiv către acceptarea lor drept constituenți reali ai hadronilor.

Câteva întrebări importante rămâneau fără răspuns. Comportamentul funcției de structură putea fi înțeles corect doar presupunând că, în interiorul protonului sau al neutronului, cuarcii se mişcă separat încoace şi-ncolo, absolut independent unul de altul. Şi totuşi, dacă electronii de 20 GeV loviseră cuarcii individuali, producând distrugerea gazdelor nucleonice țintă, cum se face că nici un cuarc liber nu ieşise în afară?

Era absurd. Dacă forța tare ținea cuarcii atât de strâns legați în interiorul nucleonilor, încât aceştia erau „închişi" pe vecie şi nu puteau fi văzuți niciodată, cum era posibil ca în interiorul nucleonilor ei să se mişte aparent atât de liber?

*

La sfârşitul lui 1971 fusese elaborată o teorie cuantică de câmp completă a interacțiilor electroslabe, iar încrederea teoreticienilor era în creştere. Ruperea simetriei folosind mecanismul Higgs putea explica deosebirea dintre electromagnetism şi forța

nucleară slabă, care ar fi fost altminteri o singură forță universală electroslabă. Ruperea simetriei lăsase fotonul fără masă, în vreme ce le dăduse masă purtătorilor forței slabe. Forța slabă necesita doi purtători de forță încărcați, particulele W^+ şi W^-, dar şi un purtător neutru, Z^0. Dacă Z^0 exista, atunci interacțiile care implicau schimbul său era de aşteptat să se manifeste sub forma unor curenți slabi neutri.

Dacă teoria era corectă, atunci kaonii neutri puteau prezenta curenți neutri care să implice şi o schimbare a stranietății. Absența destul de supărătoare a unor asemenea curenți care schimbau stranietatea era acum explicată invocând mecanismul GIM şi existența unui al patrulea cuarc, cuarcul charm.

Teoreticienii şi-au îndreptat atenția către alte surse de curenți slabi neutri, care să nu implice o schimbare a stranietății, şi au început să-i preseze pe experimentatori să le caute. Evenimentele cu cele mai mari şanse păreau să fie cele care implicau interacțiile dintre neutrinii miuonici şi nucleoni: protoni şi neutroni. În ciocnirea unui neutrin miuonic cu un neutron, de exemplu, schimbul unei particule W^- virtuale, transformă neutrinul miuonic într-un miuon negativ, iar neutronul într-un proton. Acesta e un curent încărcat. Schimbul unei particule Z^0 virtuale lasă intacți şi neutrinul miuonic, şi neutronul – este un curent neutru (vezi figura 16). Dacă au loc ambele procese, atunci dovada existenței curenților neutri ar putea fi obținută realizând ciocnirea neutrinilor miuonici pe nucleoni şi căutând evenimente în care nu se produc miuoni. Weinberg a estimat că la fiecare 100 de evenimente prin curenți încărcați ar putea fi între 14 şi 33 de evenimente prin curenți neutri.

Problema era că neutrinii sunt particule neutre extrem de uşoare, care nu lasă nici o urmă în detectorii de particule. Asemenea detectori depind de trecerea particulelor *încărcate* care dislocă electronii din atomii materiei din care sunt alcătuiți detectorii, lăsând ca semn o dâră de ioni încărcați în drumul lor. Primul detector de acest tip a fost inventat de fizicianul scoțian

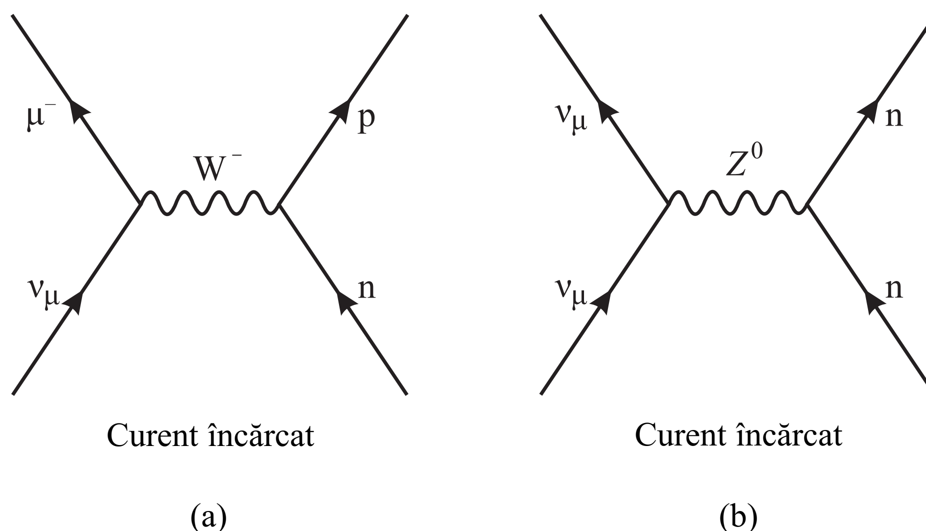


Figura 16. (a) Un neutron se ciocneşte de un neutrin miuonic şi între ei se schimbă o particulă virtuală W^-. Aceasta transformă neutronul în proton şi neutrinul în miuon. Este un „curent“ încărcat. Dar aceeaşi ciocnire poate să implice şi schimbul unei particule Z^0 virtuale, ca în graficul (b). Nu se produce nici o schimbare a identității particulelor. Acest eveniment „fără miuoni“ este un curent neutru.

Charles Wilson în 1911. În „camera cu ceață“ a lui Wilson, traiectoriile particulelor devin vizibile prin condensarea vaporilor de apă în jurul ionilor care sunt lăsați în urmă.

Camera cu ceață a fost înlocuită la începutul anilor ’50 de camera cu bule, inventată de fizicianul american Donald Glaser, dar principiile lor sunt foarte asemănătoare. O cameră cu bule e umplută cu un lichid menținut foarte aproape de punctul de fierbere. O particulă încărcată care trece prin lichid lasă din nou o urmă de ioni şi electroni în drumul său. Dacă presiunea de deasupra lichidului e micşorată, lichidul începe să fiarbă. Dar va fierbe mai întâi de-a lungul dârei de ioni lăsați în urmă de particulă, formând o serie de bule care fac ca urma să devină vizibilă. Urmele pot fi apoi fotografiate, iar presiunea e crescută pentru a opri fierberea în continuare a lichidului.

Avantajul camerei cu bule este că lichidul din cameră poate servi drept țintă pentru particulele din accelerator. Majoritatea

camerelor cu bule foloseau hidrogen lichid, dar lichide mai grele ca propanul sau freonul (lichide folosite în frigiderele mai vechi) au putut fi, de asemenea, folosite.

Singurul indiciu pentru un eveniment „fără miuoni“ de tipul pe care Weinberg îl căuta era o cascadă de hadroni apărând brusc în detector, aparent de nicăieri. Dar puteau exista şi multe alte explicații, destul de comune, pentru asemenea explozii misterioase de hadroni. Neutrinii miuonici puteau lovi atomii din pereții detectorului, extrăgând din întâmplare neutroni care puteau produce apoi hadroni aleatorii în detector. Evenimentele având loc „în amonte“, în detector, puteau genera neutroni care să producă apoi hadroni. Iar dacă un miuon produs într-un eveniment de tip curent încărcat era împrăştiat la un unghi de recul mare, exista o mare probabilitate ca el să fie pierdut cu totul. Evenimente de fond ca acestea puteau fi uşor interpretate în mod greşit drept veritabile evenimente fără miuoni, şi deci identificate eronat drept curenți slabi neutri.

Experimentatorii erau extrem de prudenți din pricina dificultăților implicate într-o asemenea căutare. O listă a priorităților experimentale întocmită de fizicienii de la CERN în noiembrie 1968 punea particulele W pe primul loc, dar căutarea curenților neutri ocupa un modest loc opt. „Realitatea este că, până în 1973, nu aveam o dovadă fermă în favoarea curenților neutri, şi existau numeroase probe împotriva lor“, spunea fizicianul Donald Perkins de la Oxford.[4]

Totuşi, în primăvara lui 1972, progresele teoretice enorme care fuseseră realizate au împins căutarea în fruntea listei. Fizicienii au început să creadă că ar putea să obțină un răspuns definitiv.

O colaborare internațională amplă şi în continuă creştere, condusă de fizicienii Paul Musset de la CERN, André Lagarrigue de la laboratorul de acceleratoare de la Orsay şi Donald Perkins, utiliza „Gargamelle“, cea mai mare cameră cu bule cu lichid greu din lume. Finanțată de Comisia Franceză pentru Energie

Atomică, Gargamelle fusese construită în Franța şi instalată la CERN în 1970, alături de sincrotronul de protoni de 26 GeV.* Construcția ei durase şase ani şi fusese proiectată în mod special pentru studiul ciocnirilor care implicau neutrini.

Gargamelle fusese în funcțiune timp de aproape un an şi indicase o mulțime de evenimente fără miuoni care fuseseră respinse ca „zgomot" de fond produs de neutronii accidentali. Experimentatorii au început să privească acum aceste evenimente cu un interes reînnoit.

Provocarea era de a distinge evenimentele veritabile fără miuoni produse prin curenți slabi neutri de cele produse de neutronii de fond, de împrăştierea miuonilor la unghiuri mari şi de identificarea greşită. Era o sarcină grea şi destul de ingrată, dar cam pe la finele lui 1972 mulți fizicieni din colaborarea Gargamelle, care includea acum cercetători din şapte laboratoare europene şi invitați din America, Japonia şi Rusia, au început să creadă că găsiseră ceva. Dar părerile în interiorul colaborării erau împărțite, nu atât privind realitatea sau absența curenților neutri înşişi, ci mai ales când se punea problema dacă dovezile pe care le strânseseră erau suficient de convingătoare.

Între timp, o a doua căutare începuse în America. Sincrotronul de protoni cel mai mare din lume fusese construit la Laboratorul Național de Acceleratoare (NAL)** din Chicago, atingând în martie 1972 energia proiectată de 200 GeV. Fizicianul italian Carlo Rubbia de la Harvard, Alfred Mann de la Universitatea din Pensylvania şi David Cline de la Universitatea din Wisconsin foloseau acum fasciculele de neutrini miuonici generate de sincrotron pentru a căuta evenimente fără miuoni. Echipa de la CERN avea un uşor avans, dar rezultatele lor pre-

---

* Ea a fost numită după mama uriaşului Gargantua din romanele *Viața lui Gargantua* şi *Pantagruel* ale scriitorului francez din secolul XVI François Rabelais. (*N. a.*)

** Acesta şi-a schimbat numele în Laboratorul Național Fermi pentru Acceleratoare (Fermilab) în 1974. (*N. a.*)

liminare fuseseră neconcludente. Rubbia era ambițios și hotărât să câștige competiția.

Să găsești evenimente fără miuoni era ușor. Să demonstrezi că ele proveneau din curenți slabi neutri era greu. Când Musset a prezentat alte date preliminare la începutul lui 1973, nu s-a făcut publicitate, nu s-a pretins că marea descoperire pe care toți o urmăreau fusese făcută.

Avantajul celor de la NAL le-a dat ocazia să-i ajungă din urmă. Sincrotronul lor era mai puternic, capabil să creeze mai multe evenimente de împrăștiere a neutrinilor miuonici într-un timp mai scurt. Detectorul lor furniza, de asemenea, o masă mai mare pentru țintă decât Gargamelle, sporind șansele de a detecta evenimente de împrăștiere. Acești factori au permis să se reducă impactul neutronilor de fond, dar nu se putea face nimic în privința miuonilor împrăștiați la unghiuri mari, care „scăpau" fără a fi detectați. Rubbia și echipa lui de la Harvard au căutat să ia în considerare această contribuție folosind o simulare pe calculator, scăzând o estimare teoretică a contribuției din numărul de evenimente fără miuoni măsurate experimental, și ajungând astfel la numărul evenimentelor autentice fără miuoni.

Era un compromis stângaci, iar Mann și Cline erau foarte neîncrezători. Conștient de faptul că fizicienii de la CERN își adunau și ei dovezile, Rubbia era grăbit.* Mann și Cline au înțeles prea bine că asemenea presiuni pot foarte ușor să-i facă pe fizicieni să se autoamăgească, să se convingă de existența a ceva ce de fapt nu există. Ei au îndemnat la prudență.

Vestea despre rezultatele fizicienilor de la NAL a ajuns la CERN în iulie 1973. Rubbia i-a scris lui Lagarrigue pretinzând

---

* Examinând câteva fotografii mai vechi de la Gargamelle, fizicienii de la CERN găsiseră și ei între timp un eveniment excepțional de curent slab neutru. Acesta implica interacția unui antineutrin miuonic cu un electron, un proces mult mai rar, dar care nu e contaminat de fond. Era o dovadă indubitabilă, însă exista totuși o singură fotografie. În cele din urmă, după ce au fost cercetate aproape un milion și jumătate de fotografii, s-au găsit doar *trei* astfel de evenimente. (*N. a.*)

că ei adunaseră „aproximativ o sută de evenimente [produse prin curenți neutri] neambigue“[5]. El a propus ca grupurile să-şi publice simultan rezultatele. Lagarrigue a refuzat politicos. Fizicienii de la CERN identificaseră evenimente pure fără miuoni în ciocnirile neutrinilor miuonici cu nucleonii şi estimaseră că raportul dintre evenimentele prin curenți neutri şi prin curenți încărcați era 0,21. Pentru ciocnirile care implicau antineutrini miuonici raportul era 0,45. Fizicienii au putut acum să declare că, în sfârşit, curenții neutri fuseseră descoperiți, şi au trimis un articol la revista *Physics Letters*. Articolul a fost publicat în septembrie.

Combinând datele obținute atât cu neutrini, cât şi cu antineutrini miuonici, grupul de la NAL găsise că raportul dintre curenții neutri şi cei încărcați era 0,29, în bună concordanță cu rezultatele de la CERN.*

În această împrejurare critică, viza americană a lui Rubbia a expirat şi, cu toate că avea un post de profesor la Harvard, era amenințat cu expulzarea. În timpul audierii în recurs la birourile Serviciului pentru Imigrări şi Naturalizări din Boston, el şi-a ieşit din fire. A fost îmbarcat într-un avion şi expulzat din țară în mai puțin de 24 de ore.

Cu Rubbia ieşit din joc, colaboratorii NAL au început să dea înapoi. Articolul pe care îl trimiseseră la *Physical Review Letters* în august fusese respins de referenții care bănuiau că problema eliminării falselor evenimente fără miuoni nu fusese abordată corect. Cline şi Mann şi-au reconstruit detectorul, vrând să tranşeze într-un fel sau altul problema.

Evenimentele autentice fără miuoni au dispărut imediat, raportul dintre curenții neutri şi cei încărcați scăzând la 0,05.

---

* Raportul dintre numerele de neutrini şi antineutrini miuonici în experimentele de la NAL era de ordinul doi la unu. Media ponderată a rapoartelor obținute de CERN cu neutrini şi antineutrini miuonici este deci 0,29. (*N. a.*)

Fizicienii de la NAL erau convinşi că fuseseră induşi în eroare de rezultatele lor anterioare.

Rubbia, o figură proeminentă şi la CERN, era hotărât să agite spiritele. El a căutat să-l convingă pe directorul general al CERN, Willibald Jentschke, că fizicienii din colaborarea Gargamelle făcuseră o mare greşeală. CERN se afla încă în umbra mai prestigioşilor rivali americani, iar reputația sa internațională avusese de suferit de câteva ori în trecut din cauza unor erori. Mulți fizicieni europeni erau înclinați să creadă că rezultatul de la Gargamelle trebuie să fie greşit, iar un reputat cercetător de la CERN şi-a pus în joc o jumătate din rezerva de vin din pivniță pariind împotriva rezultatului. Îngrozit la gândul că reputația CERN era pe cale să sufere o nouă lovitură, Jentschke i-a convocat într-o reuniune pe fizicienii colaborării Gargamelle. Părea o adevărată inchiziție.

Dar, deşi fizicienii de la Gargamelle erau marcați de aceste evenimente, ei au rămas fermi pe poziție. Au ales să-şi mențină concluziile. Întâlnindu-l pe Jentschke în lift la CERN, Perkins i-a oferit câteva asigurări. „Ştiam că grupul efectuase de multe ori analiza evenimentelor şi timp de aproape un an căutaserăm insistent alte explicații ale efectelor observate, fără succes", a explicat Perkins. „De aceea eram convins că rezultatul era perfect justificat, şi [Jentschke] trebuia să ignore pur şi simplu zvonurile de dincolo de Atlantic. Nu ştiu dacă cuvintele mele l-au liniştit, dar a ieşit din lift cu un zâmbet pe față."[6]

Rubbia s-a întors la NAL la începutul lui noiembrie şi, împreună cu fizicienii de acolo, a început să redacteze un articol oarecum diferit, declarând că nu fuseseră găsiți curenții slabi neutri, ceea ce intra în contradicție cu rezultatele recente de la CERN şi cu predicțiile teoriei electroslabe.

Iată ce a urmat după această răsturnare de atitudine destul de jenantă. Pe la mijlocul lui decembrie 1973, fizicienii de la NAL şi-au dat seama că pionii care apăreau din alte ciocniri

ale neutrinilor fuseseră interpretați în mod greşit în detectorul lor ca miuoni. Acest efect eliminase practic numărătoarea evenimentelor fără miuoni. Curenții slabi neutri au revenit. Cline a trebuit acum să recunoască „posibilitatea clară ca un semnal fără miuoni de ordinul a 10% să fie vizibil în date“[7]. N-a putut găsi o altă explicație pentru aceste evenimente. Echipa de la NAL a hotărât să trimită din nou la revistă articolul inițial, cu modificarea respectivă. El a fost publicat în *Physical Review Letters* în aprilie 1974.

Unii fizicieni din comunitatea științifică au numit în glumă acest episod descoperirea „curenților neutri alternativi“.

Până la mijlocul lui 1974, alte laboratoare confirmaseră rezultatul, iar confuzia se risipise. Curenții slabi neutri erau un fapt experimental stabilit.

Dar implicațiile acestei descoperiri erau încă şi mai importante. Curenții slabi neutri indicau existența „fotonilor grei“ răspunzători pentru transmiterea forței slabe. Iar, dacă nu se puteau găsi curenți neutri în dezintegrările particulelor stranii, motivul era că mecanismul GIM îi suprima.

Cu alte cuvinte, trebuia să existe şi un al patrulea cuarc.

CAPITOLUL 7

Trebuie să fie particulele W

În care este formulată cromodinamica cuantică, este descoperit cuarcul charm, iar particulele W şi Z sunt găsite exact acolo unde se prezisese că trebuie să fie.

Toate piesele jocului de puzzle erau acum la locul lor. Enigma existenţei particulelor punctiforme care se mişcă liber în interiorul nucleonilor, descoperite în experimentele de împrăştiere profund inelastică de la SLAC, s-a dovedit că nu era deloc o enigmă. Era o consecinţă directă a naturii forţei nucleare tari, al cărei comportament contrazice oarecum intuiţia.

Când ne imaginăm natura interacţiei guvernate de forţa dintre două particule, ne gândim de regulă la exemple precum gravitaţia sau electromagnetismul, în care forţa devine tot mai puternică pe măsură ce particulele se apropie una de alta.* Dar forţa nucleară tare nu se comportă aşa. Forţa manifestă proprietatea cunoscută sub numele de *libertate asimptotică*. În limita „asimptotică" în care distanţa dintre doi cuarci este zero**, particulele nu simt nici o forţă şi sunt complet „libere". Dar, când distanţa dintre ele depăşeşte marginea nucleonului, forţa tare îşi întăreşte strânsoarea şi le ţine în şah.

E ca şi cum cuarcii ar fi legaţi la capetele unui elastic tare. Când cuarcii se află aproape unul de altul în interiorul unui

---

* Gândiţi-vă la experienţa din copilărie când încercaţi să apropiaţi polii nord a doi magneţi în formă de bară. Rezistenţa pe care o simţeaţi creştea când aduceaţi magneţii mai aproape unul de altul. (*N. a.*)

** Această limită se atinge când particulele se apropie una de alta cu viteze foarte mari. De aceea, limita asimptotică se defineşte în mod echivalent prin aceea că valorile impulsului relativ tind către infinit. (*N. t.*)

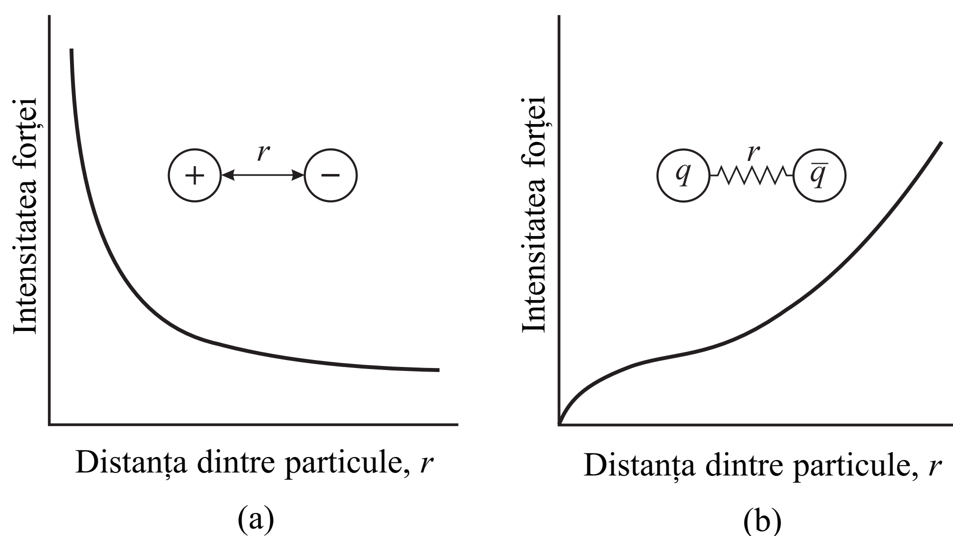


Figura 17 (a) Forța electromagnetică de atracție dintre două sarcini încărcate electric crește când particulele se mişcă mai aproape una de alta. Dar forța de culoare care leagă cuarcii în interiorul hadronilor se comportă destul de diferit (b). La limita distanței nule dintre un cuarc şi un anticuarc (de exemplu), forța scade la zero. Forța creşte pe măsură ce cuarcii sunt separați.

nucleon, elasticul este relaxat, iar forța e foarte mică sau chiar zero. Forța se simte doar când tragem de cuarci ca să-i separăm, şi astfel întindem elasticul (vezi figura 17).

Spre sfârşitul anului 1972, teoreticianul David Gross de la Princeton îşi propusese să arate că libertatea asimptotică era pur şi simplu imposibilă într-o teorie cuantică de câmp. Cu ajutorul studentului său Frank Wilczek, el a reuşit însă să demonstreze exact contrariul. Teoriile cuantice de câmp bazate pe simetrii de etalonare locale pot fi compatibile cu libertatea asimptotică. Un tânăr student postdoctoral de la Harvard, pe nume David Politzer, a făcut în mod independent aceeaşi descoperire. Articolele lor au fost publicate una după altul în volumul din iunie 1973 al *Physical Review Letters*.*

---

* De fapt, 't Hooft ajunsese deja la concluzia că teoriile de etalonare Yang–Mills puteau avea acest comportament contraintuitiv, dar în

Gell-Mann s-a retras încă o dată la Centrul Aspen în acel iunie, înarmat cu preprinturile articolelor lui Gross–Wilczek şi Politzer. I s-au alăturat Fritzsch şi Heinrich Leutwyler, un teoretician elveţian de la Universitatea din Berna, aflat în vizită la Caltech. Împreună, ei au construit o teorie cuantică de câmp de tip Yang–Mills pentru trei cuarci cu culoare şi opt gluoni coloraţi fără masă.* Pentru a descrie libertatea asimptotică, gluonii *trebuiau* să aibă sarcină de culoare. Nu era necesar nici un artificiu care să implice un mecanism de tip Higgs.

Noua teorie avea nevoie de un nume. În 1973 Gell-Mann şi Fritzsch o numiseră hadrodinamica cuantică, dar în vara următoare Gell-Mann s-a gândit că poate găsi un nume mai bun. „Teoria avea multe virtuţi şi nici un viciu cunoscut", a explicat el. „În timpul verii următoare petrecute la Aspen am născocit pentru teorie numele de cromodinamică cuantică** şi am pledat în favoarea ei pe lângă Heinz Pagels şi alţii."[1]

O sinteză importantă, combinând teoriile forţelor tare şi electroslabă într-o singură structură SU(3)×SU(2)×U(1), părea să fie în sfârşit realizată.

Dar, deşi libertatea asimptotică putea explica de ce cuarcii interacţionează doar foarte slab în interiorul hadronilor, ea nu explica de ce cuarcii sunt închişi înăuntrul acestora. Diverse modele sugestive au fost propuse. Într-un astfel de model, câmpurile gluonice care înconjoară cuarcii formează tuburi înguste

---

acel moment el era prins în lucrul la problema renormării şi nu a dezvoltat ideea. (*N. a.*)

* Gluoni fără masă? Cum stăm atunci cu afirmaţiile făcute de Heisenberg şi Yukawa, că purtătorii forţei tari trebuie să fie particule mari, masive? Aceasta ar fi într-adevăr o cerinţă dacă forţa tare ar fi asemănătoare cu gravitaţia sau cu electromagnetismul, dar nu este aşa. Forţa de culoare liberă asimptotică poate fi transmisă foarte bine de particule fără masă. Ca şi cuarcii, aceste particule sunt ţinute prizoniere în interiorul hadronilor, ceea ce explică faptul că ele nu sunt omniprezente precum fotonii. (*N. a.*)

** În original, *quantum chromodynamics*, prescurtat QCD. (*N. t.*)

sau „corzi“ cu sarcină de culoare între cuarcii care se separă. Pe măsură ce cuarcii se îndepărtează unul de altul, coarda este mai întâi tensionată şi apoi se alungeşte, rezistența față de alungirea în continuare crescând odată cu creşterea separării.

În cele din urmă coarda se rupe, dar la energii atât de mari, încât perechi cuarc–anticuarc pot apărea în mod spontan din vid. Astfel, nu putem extrage un cuarc din interiorul unui nucleon, de exemplu, fără a crea un anticuarc, care se va uni imediat cu cuarcul pentru a forma un mezon, şi un alt cuarc, care va lua locul primului cuarc înăuntrul nucleonului. Rezultatul final este că energia e canalizată către crearea spontană a unui mezon, şi nu se observă nici un cuarc individual. Cuarcii nu sunt propriu-zis prizonieri pe vecie, dar absolut niciodată nu pot fi văzuți fără un însoțitor.*

Costul, exprimat în energie, al unei sarcini de culoare izolate sau „neîmbrăcate“ este mare. În principiu, energia unui cuarc singur, izolat, e infinită. Cuarcul acumulează rapid un înveliş de gluoni virtuali în încercarea de a masca sarcina de culoare, iar energia creşte. Sarcina de culoare e mascată cu un cost mult mai mic în energie prin unirea cuarcului cu un anticuarc de aceeaşi culoare sau prin combinarea lui cu alți doi cuarci de culori diferite, astfel încât sarcina de culoare netă este zero, şi particula gazdă rezultantă e „albă“.

Dar sarcina cuarcului nu poate fi complet mascată. Pentru aceasta ar trebui să putem aşeza cumva cuarcii exact unul peste altul. Cuarcii sunt însă la fel ca electronii – sunt particule cuantice cu proprietăți şi de unde, şi de particule. Conform principiului de incertitudine al lui Heisenberg, fixarea în acest fel a pozițiilor cuarcilor ar conduce la o incertitudine infinită în privința impulsurilor lor. De aici rezultă posibilitatea unui impuls infinit, care e la fel de costisitor.

---

* Analogii de acest tip sunt pline de culoare (nici o intenție de a face un joc de cuvinte!), dar rămân speculative. Şi astăzi, prizonieratul cuarcilor în hadroni rămâne o problemă în QCD care îşi aşteaptă rezolvarea. (*N. a.*)

Natura ajunge la un compromis. Sarcina de culoare nu poate fi complet mascată, dar energia manifestată în câmpurile gluonilor asociați poate fi redusă până la valori acceptabile. Această energie este totuşi substanțială. Se ştie că masele (ipotetice) ale cuarcilor up şi down sunt destul de mici, între 1,5 şi 3,3 MeV şi, respectiv, între 3,5 şi 6,0 MeV.* De unde provine atunci restul de masă a protonului? El provine din *energia* câmpurilor gluonilor din interiorul protonului.

„Depinde inerția unui corp de conținutul său în energie?" se întrebase Einstein în 1905. Răspunsul este da. Aproximativ 99% din masa protonilor şi a neutronilor este purtată de gluonii fără masă care țin cuarcii legați între ei. „Masa, o proprietate aparent ireductibilă a materiei şi un alt nume pentru rezistența la schimbare şi inerția ei", spunea Wilczek, „reflectă de fapt interdependența armonioasă dintre simetrie, incertitudine şi energie."[2]

*

Glashow s-a dus la Brookhaven în august 1974 pentru a-i îndemna încă o dată pe experimentatori să caute cuarcul charm. Fizicianul american Samuel Ting urmărea atent problema. El se pregătea să folosească sincrotronul cu gradient alternativ (Alternating Gradient Synchrotron – AGS) de 30 GeV pentru a studia ciocnirile proton–proton la energii înalte şi pentru a izola cu grijă perechile electron–pozitron ce apăreau în haosul de hadroni produşi.

Când datele au dezvăluit că perechile electron–pozitron se acumulau într-o „rezonanță" îngustă la o energie de aproximativ 3 GeV, experimentatorii n-au prea ştiut cum s-o interpreteze. Ei au căutat să elimine sursele evidente de eroare şi au refăcut analiza. Nu s-a schimbat nimic. Vârful rămânea fixat cu încăpățânare la 3,1 GeV şi era în continuare îngust. Bănuiala experimentatorilor era că putea fi vorba de o fizică nouă.

---

* Aceste date pentru masele cuarcilor sunt luate din C. Amsler *et al., Physics Letters* B, 667 (2008), p. 1. (*N. a.*)

Ting a rămas circumspect. Îşi câştigase reputaţia din descoperirea erorilor în experimentele altor fizicieni şi nu voia să cadă el însuşi victimă aceluiaşi tratament. A rezistat presiunii de a publica rezultatele înainte de a avea şansa unei confirmări a datelor.

În acest timp, pe Coasta de Vest a Americii, fizicianul Roy Schwitters de la Universitatea Stanford avea o problemă. Inelele asimetrice pentru electroni şi pozitroni de la Stanford (Stanford Positron Electron Asymmetric Rings – SPEAR), folosite pentru a ciocni electroni şi pozitroni acceleraţi, începuseră să funcţioneze la SLAC la mijlocul anului 1973. Schwitters descoperise o eroare într-unul dintre programele de calculator folosite pentru analiza datelor de la experimentele SPEAR. Când a corectat-o, datele reanalizate din experimentele efectuate în iunie 1974 indicau acum o structură – mici creşteri între 3,1 şi 4,2 GeV. Conducătorul proiectului, fizicianul american Burton Richter, a fost convins în cele din urmă să reconfigureze SPEAR pentru energii de ciocnire de aproximativ 3,1 GeV, astfel încât experimentatorii să poată reface măsurătorile.

În noiembrie 1974, devenise clar că atât grupul lui Ting de la Brookhaven, cât şi grupul lui Richter de la SLAC descoperiseră aceeaşi particulă nouă, un mezon format dintr-un cuarc charm şi un anticuarc charm. Grupul lui Ting se decisese s-o numească particula J, grupul lui Richter a numit-o ψ (psi). Această descoperire comună a fost ulterior numită „revoluţia din noiembrie".

A urmat un oarecare suspans în problema priorităţii. Nici un grup n-a cedat prioritatea adoptând numele dat de celălalt, iar particula este numită şi azi J/ψ. Ting şi Richter au împărţit Premiul Nobel pentru fizică pe anul 1976.

*

Descoperirea lui J/ψ a fost un triumf pentru fizica teoretică şi experimentală. Ea a contribuit, de asemenea, la lămurirea struc-

turii particulelor fundamentale – baza a ceea ce avea să devină în curând „Modelul Standard“ al fizicii particulelor.

Existau acum două „generații“ de particule fundamentale, constând fiecare din doi leptoni şi doi cuarci, şi particulele răspunzătoare pentru transmiterea forțelor dintre ele. Electronul, neutrinul electronic, cuarcul up şi cuarcul down formează prima generație. Miuonul, neutrinul miuonic, cuarcul strange şi cuarcul charm formează a doua generație, care se deosebeşte de prima prin masele particulelor. Fotonul transmite forța electromagnetică, particulele W şi Z transmit forța nucleară slabă, iar cei opt gluoni colorați transmit forța nucleară tare, sau forța de culoare, între cuarcii colorați.

În primăvara lui 1977 se acumulaseră însă dovezi zdrobitoare privind o versiune şi mai grea a electronului – numită leptonul tau. Nu era o veste bună pentru fizicieni.

Un lepton tau avea nevoie şi de un neutrin tau şi, inevitabil, s-a ivit ipoteza că există de fapt *trei* generații de leptoni şi cuarci. Fizicianul american Leon Lederman a descoperit în august 1977 la Fermilab particula upsilon (Υ). Acesta e un mezon compus din ceea era cunoscut pe atunci drept cuarcul bottom şi din anticuarcul său. Cu o masă de aproximativ 4,2 GeV, cuarcul bottom este o versiune mai grea, aparținând generației a treia, a cuarcilor down şi strange, cu sarcina electrică egală cu –1/3. S-a presupus că celălalt membru al generației a treia – cuarcul top – este şi mai greu şi va fi descoperit doar atunci când vor putea fi construite acceleratoare capabile să atingă energiile de ciocnire necesare.

Deşi a fost oarecum o apariție surpriză, a treia generație de cuarci şi leptoni a fost absorbită imediat în Modelui Standard (vezi figura 18). La un simpozion organizat la Fermilab în august 1979, s-au prezentat dovezi privind apariția „jeturilor“ de tip cuarc şi gluon produse în experimentele de anihilare electron–pozitron. Acestea sunt fascicule dirijate de hadroni care provin dintr-o pereche cuarc–anticuarc în care unul din cuarci

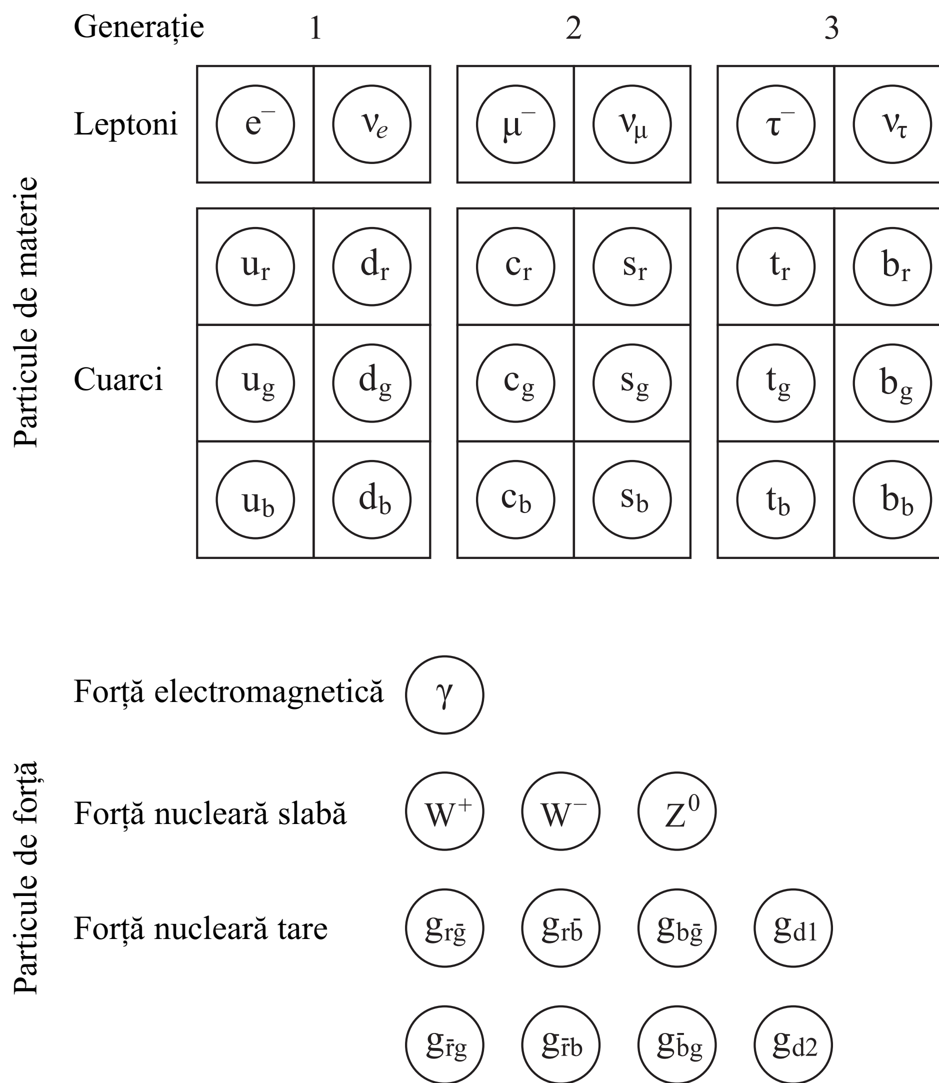


Figura 18. Modelul Standard al fizicii particulelor descrie interacțiile a trei generații de particule de materie prin trei tipuri de forțe, mediate de un ansamblu de particule de câmp sau „purtători de forță“.

„eliberează“ şi un gluon energetic. Asemenea „evenimente cu trei jeturi“ foarte sugestive oferă cea mai frapantă dovadă găsită până acum privind atât cuarcii, cât şi gluonii.

Cuarcul top lipsea încă, la fel şi dovezile directe privind particulele W şi Z, purtătorii forței slabe. În timp ce Modelul Standard devenea noua ortodoxie, Glashow, Weinberg şi Salam

au aflat că li se acordase Premiul Nobel pentru fizică pe 1979 pentru cercetările lor privind unificarea electroslabă.

Începuse acum cursa pentru descoperirea celorlalte particule necesare pentru a completa ansamblul. În discursul rostit la acordarea Premiului Nobel, Weinberg a explicat că teoria electroslabă prezice pentru masele particulelor W şi Z valori de circa 83 GeV şi, respectiv, 94 GeV.*

Încă din iunie 1976, la CERN fusese pus în funcțiune supersincrotronul de protoni (Super Proton Synchrotron – SPS), un accelerator de protoni cu o circumferință de 6,9 km, care putea genera energii ale particulelor de până la 400 GeV. Cu o lună înainte de inaugurarea SPS, aceste energii fuseseră deja depăşite de acceleratorul de protoni de la Fermilab, care atinsese 500 GeV. Dar ciocnirea particulelor pe ținte staționare implică o risipă importantă, deoarece energia preluată de particulele care ricoşează este pierdută. În acest tip de accelerator, energia care poate fi canalizată în mod eficient spre crearea de noi particule creşte doar ca rădăcina pătrată a energiei particulelor din fascicul.

De aceea, ciocnirile implicând particule accelerate chiar până la energiile atinse acum la SPS sau la acceleratorul de la Fermilab era de aşteptat să producă particule noi doar de energii mult mai joase. Pentru a atinge energiile prezise pentru particulele W şi Z era nevoie de un accelerator considerabil mai mare decât tot ce se construise până atunci.

Exista o alternativă. Ideea de a ciocni două fascicule de particule accelerate apăruse în anii ’50. Dacă particulele accelerate erau trimise în două inele de stocare legate între ele, în fascicule propagându-se pe direcții opuse, fasciculele puteau suferi ciocniri frontale. Atunci *toată* energia particulelor accelerate putea fi canalizată spre crearea de noi particule.

---

* Ştiind că masa protonului este de 938 MeV, aceste valori sunt de aproximativ 88 şi, respectiv, 100 de ori mai mari decât masa protonului. (*N. a.*)

Astfel de acceleratoare de particule pentru ciocniri frontale* au fost construite prima oară în anii ’70. SPEAR a fost unul dintre primele exemple, dar el a realizat ciocniri frontale între leptoni (electroni şi pozitroni). În 1971, la CERN s-a terminat construcția inelelor de stocare intersectate (Intersecting Storage Rings – ISR), un accelerator pentru ciocniri frontale de hadroni (proton–proton) care folosea sincrotronul de protoni de 26 GeV drept sursă de protoni accelerați. Protonii erau mai întâi accelerați în sincrotron înainte de a trece în ISR, unde se ciocneau frontal. Dar energia maximă de ciocnire (52 GeV) era în continuare insuficientă pentru a pune mâna pe particulele W şi Z.

În aprilie 1976, un grup de studiu s-a reunit la CERN pentru a prezenta următorul proiect experimental important numit „marele accelerator pentru ciocniri frontale de electroni şi pozitroni“ (Large Electron-Positron collider – LEP). Acesta urma să fie construit într-un tunel circular de 27 de kilometri care trecea pe sub frontiera franco-elvețiană, în apropiere de Geneva. El urma să folosească SPS ca să accelereze electronii şi pozitronii până la viteze apropiate de cea a luminii şi ca să-i injecteze apoi în inelul acceleratorului pentru ciocniri frontale. Ciocnirile urmau să implice particule (în acest caz electroni) şi antiparticulele lor (pozitroni) circulând în sensuri opuse într-un inel unic. Energia nominală inițială era de 45 GeV pentru fiecare fascicul de particule, ceea ce, prin combinare, urma să producă energii de ciocnire frontală de 90 GeV, aducând LEP exact în zona particulelor W şi Z.

Fizicianul american Robert Wilson, directorul Fermilab-ului, avea planuri şi mai mărețe. El voia să construiască un accelerator pentru ciocniri frontale de hadroni capabil să atingă energii de ciocnire de 1 TeV (1 000 GeV, un tera electronvolt sau un bilion de electronvolți). Acest accelerator avea să fie cunoscut în final sub numele de „Tevatron“. El avea nevoie de nişte magneți supraconductori care nu fuseseră până atunci

---

* În original, *collider*. (*N. t.*)

încercați sau testați pentru accelerarea particulelor. Şi nu era decât o propunere.

Aceasta era situația cu care se confruntau fizicienii particulelor la energii înalte în 1976. La CERN, SPS putea accelera particule până la 400 GeV, iar ISR putea atinge energii de ciocnire de 52 GeV, ceea ce nu era suficient pentru a descoperi particulele W şi Z. La LEP era în principiu posibil ca ele să fie descoperite, dar această instalație nu era disponibilă înainte de 1989. Inelul principal de la Fermilab putea accelera particule până la 500 GeV, ceea ce era tot insuficient pentru particulele W şi Z. Tevatronul, capabil în teorie să atingă energii de ciocnire de 1 TeV, era în faza de proiectare.

Fizicienii nu mai aveau răbdare să aştepte. „Presiunea pentru a descoperi W şi Z era atât de puternică", îşi amintea fizicianul Pierre Darriulat de la CERN, „încât timpul lung de proiectare, dezvoltare şi construcție a experimentului LEP era pentru cei mai mulți dintre noi, chiar şi pentru cei mai răbdători, greu de acceptat. O privire rapidă (şi, se spera, corectă) asupra noilor bosoni ar fi fost foarte bine-venită."[3] Şi fizicienii de la Fermilab îşi pierduseră răbdarea.

Fizicienilor de pe ambele maluri ale Atlanticului nu le rămânea decât să-şi imagineze cum ar putea fi împinse instalațiile existente până la regimul energiilor de interes.

*

O soluție apăruse la sfârşitul anilor '60. Era posibil – în principiu – să transformi un accelerator obişnuit într-un accelerator de hadroni pentru ciocniri frontale, producând fascicule de protoni şi antiprotoni care să circule în sensuri opuse de-a lungul unui inel de accelerare. Fasciculele puteau fi aduse apoi în situația de a se ciocni frontal. Un accelerator proton–proton avea nevoie de două inele intersectate, cu protonii din fiecare inel deplasându-se în sensuri opuse, dar ciocnirile proton–antiproton puteau fi realizate într-un singur inel. Şi era astfel posibil

să se atingă energii de ciocnire egale cu dublul celor mai înalte energii ale acceleratorului inițial.

Dar nu era o treabă simplă. Antiprotonii sunt produşi ciocnind protoni de energie înaltă cu ținte fixe (din cupru, de pildă). Un milion de asemenea ciocniri sunt necesare pentru a produce un singur antiproton. Şi mai rău e faptul că antiprotonii sunt produşi cu un spectru larg de energii, prea larg pentru a fi acceptat într-un inel de stocare. Doar o mică fracțiune din antiprotonii astfel produşi se vor „potrivi“ cu condițiile din inel, reducând considerabil atât intensitatea fasciculului de antiprotoni, cât şi *luminozitatea*, o măsură a numărului de ciocniri pe care le poate produce fasciculul.

Pentru a produce un fascicul de antiprotoni suficient de luminos pentru experimente reuşite de ciocnire proton–antiproton era necesar ca energiile antiprotonilor să fie cumva „adunate“ şi concentrate în jurul energiei dorite a fasciculului.

Din fericire, fizicianul olandez Simon van der Meer îşi imaginase cum să facă exact acest lucru. Van der Meer obținuse în 1952 o diplomă de inginer la Universitatea Tehnologică din Delft. A lucrat câțiva ani la compania electronică Philips, pentru a ajunge la CERN în 1956. La CERN, el a devenit teoretician în probleme de accelerare, ocupându-se în primul rând de aplicarea practică a principiilor teoretice în proiectarea şi funcționarea acceleratoarelor de particule.

Van der Meer efectuase în 1968 la ISR câteva experimente întemeiate pe speculații, dar a publicat un raport intern asupra rezultatelor obținute abia după patru ani. Motivul acestei întârzieri era simplu: fizica pe care o aplica părea oarecum lipsită de sens. În raportul său, el a scris: „Ideea părea prea neplauzibilă la acel moment pentru a justifica publicarea.“[4]

Experimentele sale din 1968 sugeraseră că era într-adevăr posibil să se concentreze antiprotoni cu o distribuție inițial largă de energii în intervalul de energii mult mai îngust necesar pentru inelul de stocare. Tehnica implica folosirea unui electrod „de recuperare“, care detecta antiprotonii cu energii ce se abăteau

de la energia dorită a fasciculului şi trimitea un semnal electrodului „de corecție“ din partea opusă a inelului, care aducea particulele înapoi la ordine. Semnalele transmise de la electrodul de recuperare la cel de corecție semănau cu instrucțiunile date prin fluierat de un cioban câinelui turmei. Când primeşte instrucțiunile, câinele latră la oaia răzlețită aducând-o înapoi în rând, şi face ca turma să intre în ordine în țarc.

Van der Meer a numit această tehnică „răcire stocastică“. Termenul „stocastic“ este echivalent cu „întâmplător“, iar „răcire“ se referă nu la temperatura fasciculului, ci la mişcările aleatoare şi la distribuția în energie a particulelor din fascicul. Repetând procesul de multe milioane de ori, fasciculul va converge treptat către energia de fascicul dorită. În 1974, van der Meer a efectuat câteva teste suplimentare de răcire stocastică la ISR. Rezultatele n-au fost impresionante, dar erau suficiente pentru a arăta că principiul funcționează.

În acest timp, Carlo Rubbia trecuse peste nemulțumirea de a fi fost întrecut de fizicienii de la CERN în descoperirea curenților slabi neutri. Rubbia îşi luase doctoratul la Şcoala Normală Superioară din Pisa, Italia, în 1959. El lucrase în domeniul fizicii miuonilor la Universitatea Columbia înainte de a veni la CERN în 1961. În 1970 a obținut un post de profesor la Harvard, unde a petrecut cam un an din stagiul său academic, în restul timpului ducându-se frecvent la CERN. Călătoriile numeroase i-au adus din partea studenților săi de la Harvard porecla „profesorul Alitalia“.

Rubbia era un om încăpățânat, calculat, ambițios şi foarte dificil în relațiile cu cei din jur.* El hotărâse că *nu* va fi învins în cursa pentru descoperirea particulelor W şi Z.

---

* Martinus Veltman scria despre Rubbia: „Când a fost director la CERN, îşi schimba secretarele în ritmul de una la trei săptămâni. Era mai puțin decât timpul mediu de supraviețuire a unui marinar pe un submarin sau pe un distrugător în cel de-al Doilea Război Mondial.“ Vezi Veltman, p. 74. (*N. a.*)

Pe la mijlocul lui 1976, împreună cu colegii săi de la Harvard, Rubbia îi trimisese lui Wilson propunerea de a transforma sincrotronul de protoni de 500 GeV de la Fermilab într-un accelerator pentru ciocniri frontale proton–antiproton. Wilson refuzase, preferând să-şi îndrepte în schimb eforturile către colectarea de fonduri pentru Tevatron. Tehnica răcirii stocastice părea un obiectiv îndepărtat. Dacă n-ar fi reuşit, s-ar fi pierdut un timp prețios pentru sincrotron. Wilson a fost de acord cu un experiment de o jumătate de milion de dolari, cu o instalație de dimensiuni mici, pentru a stabili dacă tehnica funcționează.

Rubbia şi-a luat pur şi simplu înapoi propunerea şi s-a dus cu ea la CERN, unde s-a bucurat de o primire mult mai favorabilă din partea lui Leon van Hove, directorul general de atunci. În iunie 1978, testele suplimentare privind răcirea stocastică efectuate la CERN dăduseră rezultate foarte încurajatoare, iar van Hove era gata sa accepte pariul. Pentru CERN era o ocazie de a descoperi noi particule, realizare care fusese timp de câțiva ani apanajul laboratoarelor americane. În plus, dacă van Hove n-ar fi acceptat, Rubbia ar fi mers cel mai probabil înapoi la Leon Lederman, care devenise director la Fermilab după demisia lui Wilson din februarie.* „Cel mai probabil, dacă CERN n-ar fi cumpărat ideea lui Carlo [Rubbia], el a fi vândut-o celor de la Fermilab“, a explicat Darriulat.[5]

Rubbia a primit permisiunea de a forma o echipă de fizicieni care să colaboreze la proiectarea complicatei structuri a detectorului necesar pentru descoperirea particulelor W şi Z. Întrucât acesta urma să fie construit pe o mare suprafață excavată lângă

---

* Wilson întâmpinase dificultăți în găsirea fondurilor pentru Fermilab şi, nemulțumit, plecase. Realitatea este că, în noiembrie 1978, după o trecere în revistă exhaustivă a opțiunilor, Lederman a hotărât că riscurile legate de folosirea instalației existente pentru ciocniri frontale proton–antiproton erau prea mari. El nu era pregătit să rişte, aşa cum a făcut van Hove, şi a hotărât să-şi folosească autoritatea pentru a încerca din nou să obțină finanțarea Tevatronului. (*N. a.*)

SPS, colaborarea a fost numită Zona Subterană 1 (Underground Area 1, prescurtat UA1). Echipa urma să crească până avea să includă aproximativ 130 de fizicieni.

La şase luni de la decizie, o a doua colaborare independentă, UA2, a fost formată sub conducerea lui Darriulat. Aceasta urma să fie o colaborare mai mică, alcătuită din circa 50 de fizicieni care urmau să intre într-o competiție amicală cu cei din UA1. Proiectul detectorului UA2 era mai puțin complicat (nu putea detecta miuoni, de exemplu), dar putea oferi o confirmare independentă a rezultatelor de la UA1.

Energiile de 270 GeV ale fasciculelor de protoni şi antiprotoni urmau să se combine în SPS pentru a produce ciocniri cu o energie totală de 540 GeV, mult peste energiile necesare pentru a pune în evidență particulele W şi Z.

*

După câteva întârzieri, colaborările UA1 şi UA2 au început în sfârşit să strângă date în octombrie 1982. Se ştia că ciocnirile care pot produce particule W şi Z urmau să fie foarte rare, de aceea ambele instalații de detecție fuseseră proiectate astfel încât să răspundă doar la ciocniri selectate, care satisfăceau nişte criterii programate în prealabil. În accelerator urmau să aibă loc câteva mii de ciocniri pe secundă timp de două luni. Şi doar câteva evenimente care să producă W şi Z erau aşteptate.

Componentele detectorului fuseseră programate să identifice evenimente care implicau emisia unor electroni sau pozitroni de energie înaltă la unghiuri mari față de direcția fasciculului. Electronii cu energii de până la aproximativ jumătate din masa lui W aveau să indice dezintegrarea particulelor W^-. Pozitronii de energie înaltă urmau să semnaleze, la rândul lor, dezintegrarea particulelor W^+. Deficitul de energie măsurat (diferența dintre energia totală a particulelor care se ciocneau şi cea a particulelor finale) semnala producerea concomitentă de antineutrini şi, respectiv, neutrini, care nu puteau fi detectați în mod direct.

Rezultatele preliminare au fost prezentate la un simpozion desfăşurat la începutul lui ianuarie 1983 la Roma. Rubbia, neobişnuit de agitat, a făcut anunțul. Din câteva mii de milioane de ciocniri care fuseseră observate, colaborarea UA1 identificase şase evenimente care erau candidați pentru dezintegrările particulei W^-. Colaborarea UA2 identificase patru candidați. Deşi rezultatele erau preliminare, Rubbia era convins: „Arată ca W, miros ca W, trebuie să fie W."[6] „Prezentarea lui a fost spectaculoasă", a spus Lederman. „Rubbia avea şi marfa, şi talentul de negustor de a o expune cu o logică pasionată."[7]

Pe 20 ianuarie 1983, fizicienii de la CERN s-au înghesuit în marea sală de conferințe pentru a asculta două seminare ținute de Rubbia pentru UA1 şi Luigi Di Lella pentru UA2. O conferință de presă a fost organizată pe 25 ianuarie. Colaborarea UA2 a preferat să se abțină de la un verdict, dar acesta a fost curând pronunțat. Particulele W fuseseră găsite, cu mase apropiate de valoarea prezisă de 80 GeV.

Descoperirea de către UA1 a lui Z^0, cu o masă apropiată de 95 GeV, a fost anunțată pe 1 iunie 1983. Ea se baza pe observarea a cinci evenimente – patru producând perechi electron–pozitron şi unul producând o pereche miuon-antimiuon. Colaborarea UA2 acumulase câteva evenimente-candidat la acel moment, dar a preferat să aştepte rezultatele unei noi runde de măsurători înainte de a le face publice. În cele din urmă, UA2 a raportat opt evenimente care produceau perechi electron–pozitron.

Până la sfârşitul lui 1983, UA1 şi UA2 aveau împreună circa o sută de evenimente $W^\pm$ şi o duzină de evenimente Z^0, masele măsurate fiind în jur de 81 GeV şi, respectiv, 93 GeV.

Rubbia şi van der Meer au împărțit Premiul Nobel pentru fizică pe anul 1984.

*

Fusese o călătorie lungă, care se poate considera că începuse odată cu articolul crucial din 1954 al lui Yang şi Mills despre

teoria cuantică de câmp SU(2) a forței tari. Era teoria care prezicea bosonii fără masă care îl enervaseră atât de tare pe Pauli. În 1957, Schwinger lansase ipoteza că forța nucleară slabă este mediată de trei particule de câmp, iar studentul său Glashow ajunsese apoi la o teorie de câmp SU(2) de tip Yang–Mills care le includea.

Descoperirea mecanismului Higgs în 1964 arătase modul în care bosonii fără masă de acest tip pot să devină masivi. Weinberg şi Salam merseseră mai departe, aplicând în 1967–1968 mecanismul Higgs în cazul ruperii simetriei electroslabe. În 1971 s-a demonstrat că teoria astfel formulată este renormabilă. Iar acum purtătorii forței slabe fuseseră găsiți exact acolo unde erau aşteptați.

Simpla existență a particulelor W şi Z cu masele prezise a oferit o dovadă cât se poate de convingătoare că teoria electroslabă SU(2)×U(1) este fundamental corectă. Şi, dacă teoria e corectă, de înzestrarea cu masă a purtătorilor forței slabe sunt răspunzătoare interacțiile cu un câmp de energie omniprezent (câmpul Higgs). Iar, dacă acest câmp Higgs există, atunci trebuie să existe şi bosonul Higgs.

Dar pentru a găsi bosonul Higgs era nevoie de un accelerator pentru ciocniri frontale şi mai mare.

CAPITOLUL 8

Pasează în profunzime

În care Ronald Reagan își folosește autoritatea pentru a sprijini construirea unui Super-accelerator Supraconductor, dar șase ani mai târziu, când proiectul este anulat de congres, din el nu mai rămâne decât o gaură în Texas.

Ce învățaseră fizicienii din experiența unificării electroslabe putea fi aplicat din nou într-o problemă mai generală. Teoria electroslabă implică faptul că la un anumit moment, la scurt timp după big bang, temperatura universului trebuie să fi fost atât de înaltă, încât forța nucleară slabă și forța electromagnetică erau indiscernabile. Exista pe atunci o singură forță electroslabă transmisă de bosoni fără masă.

Perioada e cunoscută sub numele de „epoca electroslabă". Pe măsură ce universul s-a răcit, câmpul Higgs de fond s-a „cristalizat", iar simetria de etalonare mai înaltă a forței electroslabe a fost ruptă (sau, mai corect, a fost „ascunsă"). Bosonii fără masă ai electromagnetismului (fotonii) și-au continuat nestânjeniți existența, dar bosonii forței slabe au interacționat cu câmpul Higgs și au dobândit masă pentru a deveni particulele W și Z. Consecința a fost că, în ce privește intensitatea și scala interacțiilor, forța slabă și cea electromagnetică arată acum foarte diferit.

În 1974, Weinberg, Howard Georgi, un teoretician american, și Helen Quinn, o fiziciană originară din Australia, au arătat că intensitățiile interacțiilor celor trei forțe dintre particule devin aproape egale la energii între o sută de miliarde și o sută de milioane de miliarde de GeV.* Aceste energii, corespunzând

---

* Evaluări mai recente situează această energie undeva pe la două sute de mii de miliarde de GeV. (*N. a.*)

unor temperaturi de zece miliarde de miliarde de miliarde (10^{28}) grade, ar fi fost dominante la un o sutime de milionime de miliardime de miliardime de miliardime (10^{-35}) dintr-o secundă după big bang.

Pare rezonabil să presupunem că, în această „epocă a marii unificări“, forța nucleară tare şi forța electroslabă erau indiscernabile, manifestându-se ca o singură forță „electro-nucleară“. Toți purtătorii forței erau identici şi nu existau masă, sarcină electrică, aromă a cuarcilor (up, down) sau culoare (roşu, verde, albastru). Pentru a rupe această simetrie şi mai înaltă erau necesare mai multe câmpuri Higgs care să cristalizeze la temperaturi mai înalte, producând astfel diferențele dintre cuarci, electroni şi neutrini şi dintre forța tare şi cea electroslabă.

Unul dintre primele exemple de asemenea „teorii ale marii unificări“* a fost elaborat de Glashow şi Georgi în 1974.** El era bazat pe grupul de simetrie SU(5), pe care ei l-au declarat a fi „grupul de etalonare al universului“[1]. O consecință a simetriei mai înalte a fost că toate particulele elementare erau pur şi simplu fațete ale unei entități unice. În teoria lui Glashow şi Georgi, transformările dintre cuarci şi leptoni deveniseră posibile. În particular, un cuarc din interiorul unui proton se putea transforma într-un lepton. „Şi atunci am înțeles că asta făcea ca protonul, constituentul de bază al atomului, să fie instabil“, a spus Georgi. „În acel moment m-am simțit foarte deprimat şi m-am dus să mă culc.“[2]

Cum marea unificare are loc doar la energii care nu pot fi atinse niciodată într-un accelerator de pe Pământ, am fi tentați să punem la îndoială valoarea unor asemenea teorii. Totuşi, ele prezic existența unor noi particule care pot fi în principiu puse

---

* În engleză, *grand unified theories*, prescurtat GUT. (*N. t.*)

** Deşi numite teorii ale marii unificări, teoriile GUT nu urmăresc să includă şi forța gravitației. Teoriile care fac acest lucru se numesc „teorii universale“ [în engleză, *Theories of Everything*, prescurtat TOE]. (*N. a.*)

în evidență în experimente de ciocnire. Şi, cu toate că epoca marii unificări pare să se fi încheiat cu miliarde de ani în urmă, ea a lăsat o amprentă durabilă asupra universului pe care îl putem observa astăzi.

Cel puțin aceasta a fost logica urmată de tânărul fizician american Alan Guth. El confirmase că printre particulele noi prezise de GUT era şi *monopolul magnetic*, o unitate de „sarcină" magnetică echivalentă cu un pol nord sau sud izolat. În mai 1979 el începuse să lucreze cu Henry Tye, un fizician american de origine chineză aflat în stagiu postdoctoral, pentru a determina numărul de monopoli magnetici care fuseseră probabil produşi în big bang. Misiunea lor era de a explica de ce, dacă monopolii magnetici s-au format într-adevăr în universul timpuriu, nici unul nu mai e vizibil în zilele noastre.

Guth şi Tye şi-au dat seama că pot să reducă formarea monopolilor schimbând natura tranziției de fază dintre epoca marii unificări şi cea electroslabă. Problema se rezolva ajustând proprietățile câmpului Higgs implicat. Ei au descoperit că monopolii dispăreau dacă, în locul unei tranziții sau „cristalizări" line la temperatura de tranziție, universul suferise *o suprarăcire*. În acest scenariu, temperatura scade atât de rapid, încât universul persistă în starea marii unificări mult sub temperatura de tranziție.*

Când, în decembrie 1979, Guth a explorat efectele mai ample ale instalării suprarăcirii, el a descoperit că aceasta prezicea o perioadă de expansiune exponențială formidabilă a spațiului-timp. Inițial destul de nedumerit de rezultat, el a înțeles repede că această expansiune explozivă ar putea explica unele trăsături importante ale universului observabil, într-un fel în care cosmologia big bang de la acea vreme n-o putea face. „Nu-mi amintesc să fi încercat măcar să inventez un nume pentru acest fenomen extraordinar de expansiune exponențială", avea să

---

* Apa lichidă poate fi suprarăcită la temperaturi de până la 40 de grade sub punctul de îngheț. (*N. a.*)

scrie mai târziu Guth, „dar jurnalul meu arată că pe la sfârşitul lui decembrie începusem să-l numesc *inflație*."[3]

Cosmologia inflaționară a suferit unele modificări, mai ales ca rezultat al unor ajustări ulterioare ale proprietăților câmpului Higgs folosit pentru a rupe simetria la sfârşitul epocii marii unificări. Aceste prime teorii preziceau prea multă uniformitate, conducând spre un univers anost, fără nici o structură – nici stele, nici planete, nici galaxii. Cosmologii au început să înțeleagă că germenii acestei structurii observabile trebuiau să provină din fluctuațiile cuantice din universul timpuriu, amplificate prin inflație. Dar proprietățile câmpurilor Higgs necesare pentru asta erau incompatibile cu câmpurile Higgs ale teoriei unificate de tip Glashow–Georgi.

La începutul anilor '80, rezultatele experimentale confirmau oricum că protonul e mai stabil decât prezicea teoria lui Glashow şi Georgi.* Nemaifiind constrânşi de teoriile deduse din fizica particulelor, cosmologii au fost liberi să descrie universul observabil reglând în continuare câmpurile Higgs, care, pentru a li se sublinia semnificația, au căpătat numele colectiv de câmp *inflaton*. Predicțiile lor au fost confirmate în chip spectaculos în august 1992 de datele transmise de satelitul COBE (Cosmic Backgound Explorer – Exploratorul Fondului Cosmic), care a detectat variații infime în temperatura radiației cosmice de fond, vestigiul rece al radiației fierbinți care s-a desprins de materie la aproximativ patru sute de mii de ani după big bang.**

---

* Aceste experimente implicau căutarea unui eveniment de dezintegrare a unui proton dintr-un volum mare de protoni ecranat față de razele cosmice. După cum a explicat Carlo Rubbia: „[…] era ca şi cum ai pune o jumătate de duzină de studenți masteranzi la câtiva kilometri sub pământ pentru a supraveghea un bazin mare plin cu apă timp de cinci ani." Citat în Woit, p. 104. (*N. a.*)

** Aceste variații infime ale temperaturii au fost măsurate ulterior cu şi mai multă precizie de Sonda Wilkinson de Explorare a Anizotropiei Microundelor (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, prescurtat WMAP). Rezultatele comunicate în februarie 2003, martie 2006,

Brout şi Englert, Higgs, Guralnik, Hagen şi Kibble inventaseră câmpul Higgs ca mijloc de a rupe simetriile implicate în teoriile cuantice de câmp de tip Yang–Mills. Weinberg şi Salam au arătat cum se poate aplica procedeul în cazul ruperii simetriei electroslabe, iar tehnica aceasta a fost folosită pentru a prezice masele particulelor W şi Z. Acelaşi procedeu a fost folosit apoi pentru a rupe simetria forței electro-nucleare. Metoda a avut câteva consecințe surprinzătoare, conducând la descoperirea cosmologiei inflaționare şi la descrierea precisă a structurii la scară mare a universului.

Noțiunile teoretice de câmpuri Higgs şi vidurile false, pe care ele le implică, deveniseră esențiale atât pentru Modelul Standard al fizicii particulelor, cât şi pentru ceea ce va deveni Modelul Standard al cosmologiei big bang. Dar existau cu adevărat aceste câmpuri Higgs? Fizicienii aveau la dispoziție o singură cale de a afla.

Bosonii Higgs ai teoriilor marii unificări au mase uriaşe şi sunt pur şi simplu inaccesibili acceleratoarelor de pe Pământ. Pe de altă parte, deşi masa bosonului Higgs al câmpului Higgs electroslab se dovedise inițial greu de prezis cu o precizie rezonabilă, la mijlocul anilor ’80 se credea că bosonul Higgs va fi accesibil generației următoare de acceleratoare pentru ciocniri frontale.

Fizicienii particulişti americani erau încă afectați de faptul că fuseseră învinşi de rivalii lor europeni în competiția pentru descoperirea particulelor W şi Z. Un editorial din iunie 1983 al ziarului *New York Times* anunțase „Europa 3, SUA nici măcar Z zero“, şi susținea că fizicienii europeni preluaseră acum conducerea în cursa pentru descoperirea elementelor constitutive

---

februarie 2008 şi ianuarie 2010 au contribuit la confirmarea şi rafinarea modelului standard al universului, aşa-numitul model lambda al materiei întunecate reci, „lambda-CDM“ (*cold dark matter*), în care inflația joacă un rol crucial. Conform celor mai recente date ale WMAP, universul are vârsta de 13,75 ± 0,11 miliarde de ani. (*N. a.*)

fundamentale ale naturii.[4] Fizicienii americanii voiau să-şi ia revanşa. Ei erau hotărâţi să facă tot posibilul pentru ca bosonul Higgs să fie descoperit într-un laborator american.

*

Acceleratorul Tevatron de la Fermilab a fost pus în funcţiune pe 3 iulie 1983. Inelul său de accelerare lung de şase kilometri şi-a atins energia nominală de 512 GeV după doar douăsprezece ore. Ciocnind protoni şi antiprotoni, el promitea energii de ciocnire de 1 TeV. Costase 120 milioane de dolari. ISABELLE, un nou accelerator pentru ciocniri proton–proton la 400 GeV, aflat în construcţie la Brookhaven, era acum considerat deja depăşit. În iulie, proiectul a fost anulat de Comitetul consultativ pentru fizica energiilor înalte al Departamentului pentru Energie al SUA.

La CERN tocmai urmau să înceapă lucrările de construcţie a acceleratorului pentru ciocniri frontale LEP, care avea să fie plasat într-un tunel de 27 de kilometri la aproape 180 de metri sub graniţa franco-elveţiană, pe care o intersecta în patru locuri. Acesta avea să fie cel mai mare proiect de inginerie civilă din Europa. Dar LEP era conceput ca o fabrică de particule W şi Z şi urma să fie folosit pentru a ne îmbunătăţi cunoştinţele privind noile particule şi a căuta cuarcul top care încă lipsea. El nu era destinat căutării bosonului Higgs.

Tevatronul putea oferi prilejul de a se arunca o privire asupra bosonului Higgs, dar nu exista nici o garanţie că acesta va fi descoperit. Sosise momentul unor proiecte grandioase. Lederman propusese anterior un mare salt înainte – un accelerator pentru ciocniri proton–proton bazat pe folosirea magneţilor supraconductori şi putând să atingă energii de până la 40 TeV. El îl numise „desertron“, deoarece urma să fie construit pe un teren plat din deşert şi ar fi fost singura instalaţie capabilă să traverseze „deşertul energetic“, adică domeniul energiilor în care, conform predicţiilor GUT, nu apărea o nouă fizică interesantă.

Desertronul a devenit Foarte Marele Accelerator (Very Big Accelerator – VBA). După ce anulase proiectul ISABELLE, Comitetul consultativ recomanda acum să se acorde prioritate VBA-ului, care a fost imediat rebotezat Super-acceleratorul Supraconductor (Superconducting Super-Collider – prescurtat SSC).

Proiectul SSC a fost pus la punct la sfârşitul anului 1986. Prețul estimat de 4,4 miliarde de dolari îl propulsa în prima ligă a proiectelor ştiințifice americane şi era nevoie de aprobarea preşedintelui SUA. Lui Lederman i s-a cerut să aducă un material video scurt, de 10 minute, despre proiect, pentru a fi văzut de preşedintele Ronald Reagan. El a folosit prilejul pentru a apela la spiritul de aventură al lui Reagan, făcând o paralelă între explorarea regiunilor necunoscute ale fizicii particulelor şi explorarea vestului Americii.

Cererea oficială pentru aprobarea SSC le-a fost înaintată lui Reagan şi guvernului său în ianuarie 1987, în timpul unei prezentări la Casa Albă. Argumentele pro şi contra investiției au curs fără încetare. Ministrul de finanțe a spus că, aprobând proiectul, tot ce puteai obține era că făceai o mână de fizicieni foarte fericiți. Reagan a răspuns că ăsta era un lucru pe care probabil ar trebui să-l ia în seamă, fiindcă îl făcuse foarte nefericit pe profesorul lui de fizică din şcoală.

Când discuțiile în contradictoriu s-au calmat, atenția s-a îndreptat spre Reagan, care urma să ia decizia finală. Reagan a citit cu voce tare o frază a scriitorului american Jack London: „Prefer ca rămăşițele mele să ardă într-o flacără strălucitoare decât să zacă într-un lemn putred.“[5] El a explicat că aceste cuvinte fuseseră pomenite de fundaşul Ken „Snake“ Stabler. Stabler condusese în 1977 echipa Oakland Raiders la o victorie în Super Bowl şi era celebru pentru precizia paselor sale, mai ales pentru acea pasă lungă „Ghost to the Post“, de 42 de yarzi, către Dave Casper (poreclit „Fantoma“ [*Ghost*]), care a adus egalarea în ultimele secunde ale unui meci împotriva echipei Baltimore Colts. În prelungiri, Oakland Raiders a câştigat.

Stabler interpretase citatul din Jack London după felul în care vedea el fotbalul american. „Pasează în profunzime“, spusese Stabler.[6] Într-o situație dificilă, e mai bine să adopți o strategie mai riscantă şi să te mistui într-o flacără strălucitoare.

Reagan, actor în filme comerciale înainte de a intra în politică în 1964, îşi atrăsese porecla „the Gipper“ după ce apăruse în rolul fotbalistului student George Gipp în filmul din 1940 *Knute Rokne, All American*. Gipp murise de o infecție a laringelui la vârsta de 25 de ani, iar filmul conține celebrele sale cuvinte: „Şi ultimul lucru pe care George mi l-a spus a fost ăsta: «Rock», a zis el, «când echipa e la pământ şi băieții par învinşi, spune-le să dea tot ce au mai bun şi să câştige încă un meci pentru *the Gipper*.»“[7]

Pesemne că Reagan a intrat într-o rezonanță psihologică profundă cu ideea de SSC. Deja impresionat de promisiunea că ştiința ar putea oferi Americii o puternică linie de apărare sub forma Inițiativei pentru Apărare Strategică (Strategic Defense Initiative, SDI, cunoscută şi ca „războiul stelelor“), el voia acum să dea tot ce avea mai bun în interesul supremației ştiințifice a Americii. „The Gipper“ era gata să paseze în profunzime.

*

Proiectul fusese aprobat, dar era ținta multor atacuri. În pledoaria sa, Departamentul pentru Energie explicase că SSC va deveni un proiect internațional, susținut prin contribuții financiare ale altor țări. Retorica fizicienilor americani a subminat însă această intenție. De ce ar sprijini alte țări un proiect care avea scopul evident de a restabili supremația americană în fizica energiilor înalte? Europa era oricum ferm angajată la CERN. Nu e de mirare că SSC a suscitat un interes scăzut dincolo de ocean.

Resentimente se iviseră şi în rândurile comunității fizicienilor americani, iar acestea au degenerat acum în confruntări. La un preț atât de mare, ce urma de fapt să fie sacrificat în numele

căutării bosonului Higgs? Existau destule alte proiecte mult mai puțin costisitoare, care aveau şanse să aducă un progres tehnologic prețios. Bugetul american pentru fizică nu putea finanța toate aceste proiecte şi SSC, iar proiectele mici păreau acum să fie grav periclitate. Era oare fizica energiilor înalte într-adevăr de o mie de ori mai prețioasă decât alte domenii ştiințifice?

„Ştiința mare" a devenit un termen peiorativ.

Sprijinul Congresului şi al Senatului pentru SSC s-a menținut câtă vreme amplasamentul noului accelerator nu era cunoscut. Academia Națională de Ştiință şi Inginerie a primit 43 de propuneri din 25 de state. Guvernul Texasului a înființat o comisie şi a promis o finanțare de 1 miliard de dolari dacă SSC va fi construit pe teritoriul său. Era mult mai rezonabil ca noul accelerator să fie construit la Fermilab, unde exista o mare parte din infrastructură şi unde se aflau deja mulți fizicieni de care ar fi fost nevoie. Dar, în noiembrie 1988, Academia Națională a hotărât că SSC va fi construit într-o formațiune geolgică din cretacic numită Austin Chalk, la mare adâncime sub preria texană de pe fostele plantații de bumbac din comitatul Ellis.

Vicepreşedintele lui Reagan, texanul George Bush, îi succedase acestuia ca preşedinte cu doar două zile înainte de anunț. Nu exista vreo bănuială de părtinire în decizia Academiei Naționale, dar Bush a devenit un fervent susținător. Totuşi, acum că amplasamentul era cunoscut, sprijinul din partea altor congresmeni şi senatori a început să se evapore.

Fizicienii trebuiau să se lupte în permanență pentru a obține fonduri de la Congres şi erau chemați să pledeze în favoarea proiectului de fiecare dată când acesta era supus discuțiilor. Între timp, estimările bugetului au crescut vertiginos, pe măsură ce inginerii au început să înțeleagă mai clar ce însemna să se construiască un inel uriaş de magneți supraconductori. În 1990, în momentul când s-au deblocat primele fonduri pentru începerea construcției, estimările bugetului aproape că se dublaseră, ajungând la 8 miliarde de dolari.

În Austin Chalk au fost forate puțuri de testare, iar o parte din infrastructură a fost ridicată în apropiere de Waxahachie, pe terenul de 7 000 ha rezervat de guvernul Texasului pentru proiect. S-au construit laboratoare pentru producerea şi testarea magneților. Au fost asamblate mari structuri care să adăpostească unitățile de refrigerare necesare pentru a produce şi a face să circule heliul lichid ce urma să mențină magneții la temperatura de supraconductibilitate.

S-au constituit două colaborări pentru construcția detectorilor. Colaborarea pentru detectorul solenoidal (Solenoidal Detector Collaboration – SDC) avea să cuprindă o mie de fizicieni şi ingineri din peste o sută de instituții de pe glob. Acesta era un detector cu spectru larg, costând circa 500 de milioane de dolari. Se spera că el va începe să colecteze date înainte de finele lui 1999. Grupul numit Gamas, Electrons, and Muons (GEM) avea să fie comparabil ca mărime şi să concureze cu grupul SDC.

Mulți fizicieni şi-au asumat riscul şi fie şi-au luat liber din posturile pe care le ocupau, fie le-au părăsit definitiv venind să lucreze pentru proiectul SSC. În total, circa 2000 de oameni s-au adunat în şi în jurul localității Waxahachie. Pentru un observator din exterior care nu era la curent cu politica SSC, toată această activitate trebuie să fi părut încurajatoare. Se construiau laboratoare, se forau puțuri, iar oamenii se adunau în număr mare.

Dar existau alte semne mai degrabă îngrijorătoare. Administrația americană se lupta cu un deficit bugetar deja mare şi în creştere. În ianuarie 1992 preşedintele Bush s-a întors dintr-o vizită în Japonia cu mâinile goale: japonezii insistau că SSC nu era un proiect internațional şi, ca atare, nu-l mai sprijineau. Zarva legată de „ştiința mare“ creştea neîncetat. În iunie, Camera Reprezentanților a votat în favoarea unui amendament la bugetul federal care elimina proiectul SSC. Proiectul a supraviețuit grație intervenției Senatului.

Deprimarea care începuse să se facă simțită în jurul proiectului a fost reflectată în cartea de popularizare a lui Weinberg *Visul unei teorii finale* (*Dreams of a Final Theory*), publicată în 1993. El scria:

> În ciuda tuturor construcțiilor şi forajelor, ştiam că finanțarea proiectului putea fi încă oprită. Îmi puteam închipui că puțurile de probă vor fi umplute la loc cu pământ, iar clădirea magneților va rămâne pustie, şi doar amintirile din ce în ce mai vagi ale câtorva fermieri vor sta mărturie că un mare laborator ştiințific fusese plănuit odinioară în comitatul Ellis. Poate că mă aflam sub vraja optimismului victorian al lui [Thomas] Huxley, dar nu-mi închipuiam că s-ar întâmpla aşa ceva sau că în zilele noastre căutarea legilor ultime ale naturii ar fi abandonată.[8]

În cartea ceva mai donquijotescă a lui Lederman *Particula lui Dumnezeu* (*The God Particle*), publicată în acelaşi an, autorul e trezit brutal dintr-un vis în care discuta prieteneşte cu filozoful grec Democrit:

> „Fir-ar să fie!“ Eram înapoi acasă, ridicându-mi amețit capul dintre hârtii. Am observat o fotocopie a unui titlu de ziar: Finanțarea super-acceleratorului de către Congres pusă sub semnul întrebării. Calculatorul m-a anunțat că primisem un mesaj prin e-mail: eram „invitat“ la Washington pentru o audiere în Senat în legătură cu SSC.[9]

Bill Clinton a câştigat alegerile prezidențiale în noiembrie 1992, învingându-i pe George Bush şi pe omul de afaceri texan independent Ross Perot. În iunie anul următor, estimările pentru bugetul SSC crescuseră la 11 miliarde de dolari, iar Camera Reprezentanților a votat încă o dată împotriva proiectului. După cum remarca Raphael Kasper, director asociat la SSC: „A vota

contra SSC devenise un fel de simbol al responsabilității fiscale. Era un proiect scump împotriva căruia puteai vota."[10]

Clinton era în general favorabil, dar mai puțin angajat în proiect decât fuseseră Reagan şi Bush. Se întrezărea acum şi o competiție sub forma unui program de 25 de miliarde de dolari pentru a construi stația spațială internațională, proiect care ar fi fost şi el amplasat în Texas, la Centrul Spațial Johnson al NASA din Houston.

În septembrie 1993, Weinberg, Richter şi Lederman au făcut o ultimă încercare eroică de a obține sprijin pentru SSC. Fizicianul britanic Stephen Hawking a trimis un mesaj video de susținere. Fără nici un folos.

În octombrie, Camera Reprezentanților a votat la limită (la diferență de un vot) în favoarea stației spațiale internaționale. A doua zi, Senatul a votat cu doi la unu împotriva SSC. De data asta n-a mai fost nici o amânare. S-au alocat fonduri pentru conservarea construcțiilor deja realizate. Circa 23 kilometri de tunel fuseseră excavați şi se cheltuiseră 2 miliarde de dolari (vezi figura 19), dar nici o doză de optimism victorian nu mai putea menține acum proiectul în viață. SSC murise.

Scriitorul Herman Wouk, laureat al Premiului Pulitzer, a scris un roman bazat pe experiența SSC. În prefața la această carte, intitulată *O gaură în Texas*, autorul spune:

> De la primele bombe atomice şi cu hidrogen, [fizicienii particulişti] fuseseră mereu răsfățații Congresului. Dar toate acestea s-au sfârşit brusc şi brutal. Tot ce a rămas din încercarea lor eşuată de a găsi bosonul Higgs a fost o gaură săpată în Texas, o enormă gaură abandonată.
> Ea e încă acolo.[11]

Pe 16 decembrie 1994, la ceva mai mult de un an de la oprirea SSC, statele membre CERN au votat alocarea a 15 miliarde de dolari timp de 20 de ani pentru a modifica LEP la sfârşitul vieții sale utile şi a-l transforma într-un accelerator pentru ciocniri

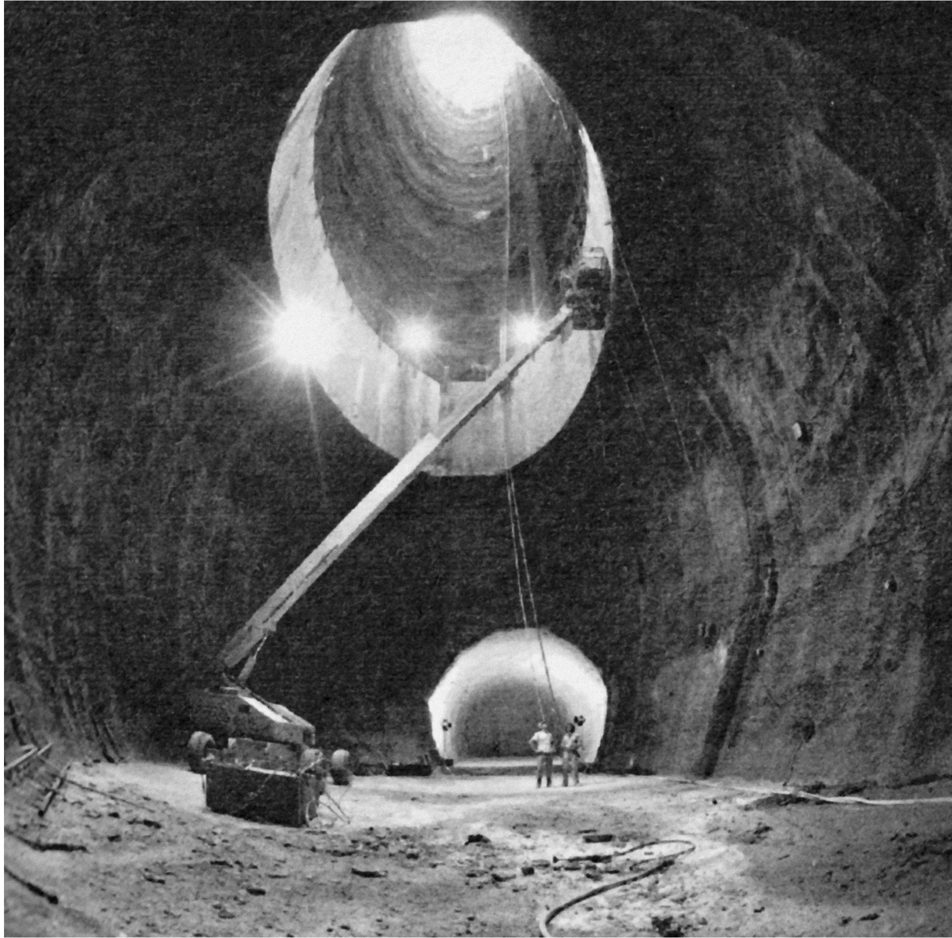


Figura 19. În octombrie 1993, când proiectul SSC a fost anulat de Congres, se cheltuiseră 2 miliarde de dolari şi fuseseră excavați 23 de kilometri de tunel sub preria texană.
Sursa: SSC Scientific and Technical Electronic Repository

proton–proton. Ideea unui Mare Accelerator de Hadroni (Large Hadron Collider – LHC) fusese discutată prima oară cu mai bine de zece ani în urmă, la o reuniune organizată de CERN la Lausanne, în Elveția, în martie 1984. El urma să producă energii de ciocnire de până la 14 TeV, mai puțin de jumătate din energia maximă a SSC, dar mai mult decât suficient pentru a descoperi Higgs-ul.

Rubbia a declarat că CERN va „pava tunelul LEP cu magneți supraconductori“[12].

CAPITOLUL 9

Un moment fantastic

În care bosonul Higgs este explicat astfel încât să poată fi înțeles și de un politician britanic, semne vagi privind Higgs-ul sunt găsite la CERN, iar Marele Accelerator de Hadroni (LHC) este pornit, dar mai apoi explodează.

SSC fusese un mare pariu, şi fizicienii pierduseră. Criticile în surdină care duseseră până la urmă la anularea proiectului american începuseră să se facă auzite şi în Europa. CERN avea avantajul că de finanțare nu răspundea o singură națiune. Dar nemulțumirile statelor membre privind valoarea contribuției lor puteau încă să se transforme într-o decizie de retragere a sprijinului. În aprilie 1993, exact la şase luni de la decizia finală a Camerei Reprezentanților de a opri finanțarea SSC, William Waldegrave, ministrul britanic al ştiinței, adresa o somație comunității fizicienilor energiilor înalte.

Somația lui Waldegrave prevestea o schimbare semnificativă în politica guvernului conservator condus de John Major în domeniul ştiinței. Un raport al guvernului, care urma să fie publicat o lună mai târziu, căuta să deplaseze accentul de la ştiință spre inovații, cu scopul ultim de a spori avuția națională şi a îmbunătăți calitatea vieții cetățenilor britanici. Cu alte cuvinte, scopul ştiinței britanice era să servească interesele economiei britanice, în beneficiul companiilor britanice. Organizarea finanțării guvernamentale pentru ştiință şi tehnologie în Marea Britanie urma să fie complet revizuită.

Semnalele erau îngrijorătoare. Marea Britanie se refăcea încă după recesiunea globală declanşată de prăbuşirea burselor în octombrie 1987, şi abia reuşea să-şi achite contribuția anuală de 55 milioane de lire sterline la CERN. Deşi fizicienii puteau

invoca multe aplicații colaterale apărute la CERN, precum proiectul de a uni hipertextul cu internetul, care a condus la inventarea rețelei globale (*world wide web*) de către Tim Berners-Lee în 1990, era pesemne greu de explicat cum ar putea descoperirea bosonului Higgs să sporească avuția națională şi să îmbunătățească viața britanicilor.

Din fericire, fizicienilor nu li se ceruse până atunci să prezinte asemenea justificări. Dar Waldegrave le-a spus cât se poate de limpede că trebuiau să explice mult mai bine ce anume încercau să facă.

Ce era de fapt acest obiect numit bosonul Higgs? De ce era el atât de important, încât era nevoie de miliarde de dolari doar pentru a-l găsi? „Dacă mă ajutați să înțeleg asta, am mai multe şanse să vă ajut să obțineți bani pentru a-l găsi", le-a spus Waldegrave participanților la o conferință anuală a Institutului de Fizică al Marii Britanii.[1] El le-a spus că, dacă cineva poate explica la ce bun atâta agitație, în cuvinte simple, pe o foaie de hârtie, el îl va răsplăti cu o sticlă de şampanie scumpă.

Desigur, agitația era produsă de rolul central pe care câmpul Higgs ajunsese să-l joace în structura Modelului Standard. Fără câmpul Higgs nu se poate produce ruperea simetriei electroslabe.* Fără ruperea simetriei, particulele W şi Z ar avea masă nulă, ca şi fotonul, iar forța electroslabă ar fi în continuare unificată. Fără interacțiile dintre particulele elementare şi câmpul Higgs, n-ar apărea masa: nu ar exista nici substanță materială, nici stele, nici planete, nici viață. Iar dovada directă pentru existența acestui câmp am putea-o avea doar descoperind parti-

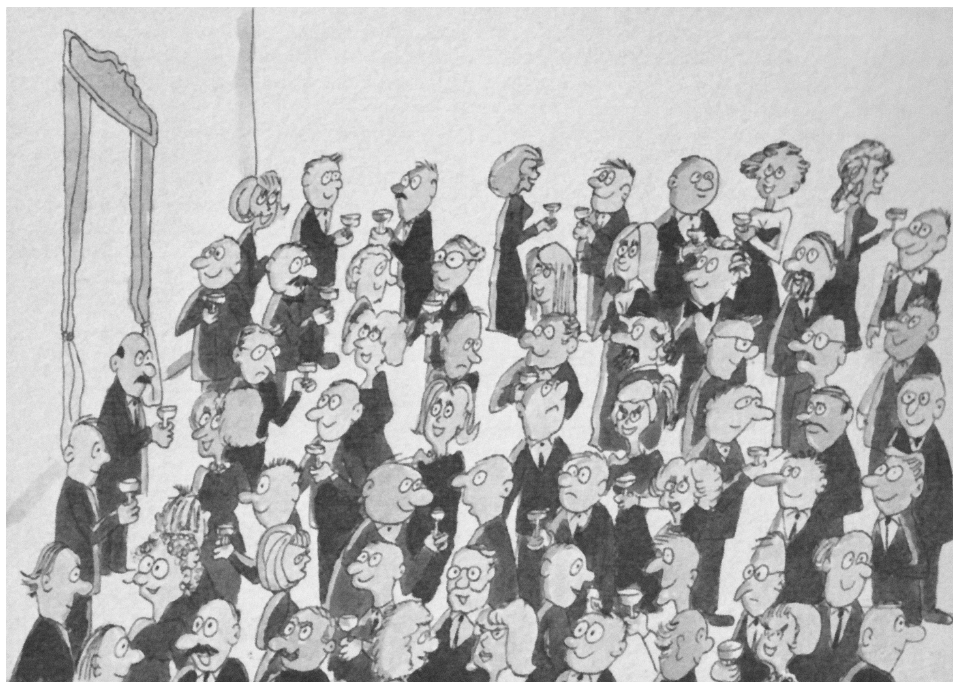
---

* Strict vorbind, acest lucru nu e chiar adevărat. O clasă de teorii numite teorii „tehnicolor" introduce noi forțe super-tari care pot, de asemenea, să producă ruperea simetriei electroslabe. Aceste teorii pot şi ele să explice masele particulelor W şi Z, dar au probleme când încearcă să prezică masele cuarcilor. Din acest motiv, mecanismul Higgs e favorizat. Steven Weinberg, comunicare personală, 24 februarie 2011. (*N. a.*)

cula sa de câmp, bosonul Higgs. Odată găsit bosonul Higgs, vom înțelege de îndată mult mai multe despre natura reală a lumii materiale.

Pentru a explica mecanismul Higgs în termeni pe care un politician i-ar putea înțelege era nevoie de o analogie simplă. David Miller, profesor de fizica particulelor şi de astronomie la University College din Londra, credea că a găsit tocmai o asemenea analogie. Cu câteva schimbări cosmetice, el s-a gândit că poate da viață explicației apelând la experiența proprie a lui Waldegrave privind o personalitate care dominase până nu demult politica britanică: fostul prim-ministru Margaret Thatcher. El a scris:

> Închipuiți-vă o mică recepție pentru activiştii partidului, care sunt distribuiți uniform într-o sală, stând toți de vorbă cu vecinii cei mai apropiați. Fostul prim-ministru Thatcher intră şi traversează încăperea. Toți activiştii din vecinătate sunt atraşi puternic şi se îngrămădesc în jurul ei. În timp ce se mişcă, ea atrage oamenii de care se apropie, în vreme ce oamenii pe care i-a părăsit se întorc la distribuția lor uniformă. Din cauza grupului de oameni strânşi mereu în jurul ei, ea are o masă mai mare decât cea normală, adică are un impuls mai mare pentru aceeaşi viteză de mişcare prin cameră. Aflată în mişcare, îi e mai greu să se oprească, iar dacă s-a oprit îi e mai greu să se mişte din nou, fiindcă procesul de grupare trebuie repornit. În trei dimensiuni şi cu complicațiile relativității, acesta e mecanismul Higgs.
>
> Pentru a da masă particulelor, s-a inventat un câmp de fond care este local distorsionat ori de câte ori o particulă se mişcă prin el. Distorsiunea – acumularea câmpului în jurul particulei – generează masa particulei. Ideea este preluată direct din fizica solidului. În loc de un câmp răspândit în tot spațiul, un corp solid conține o rețea cristalină de atomi ionizați încărcați pozitiv. Când un electron se mişcă prin



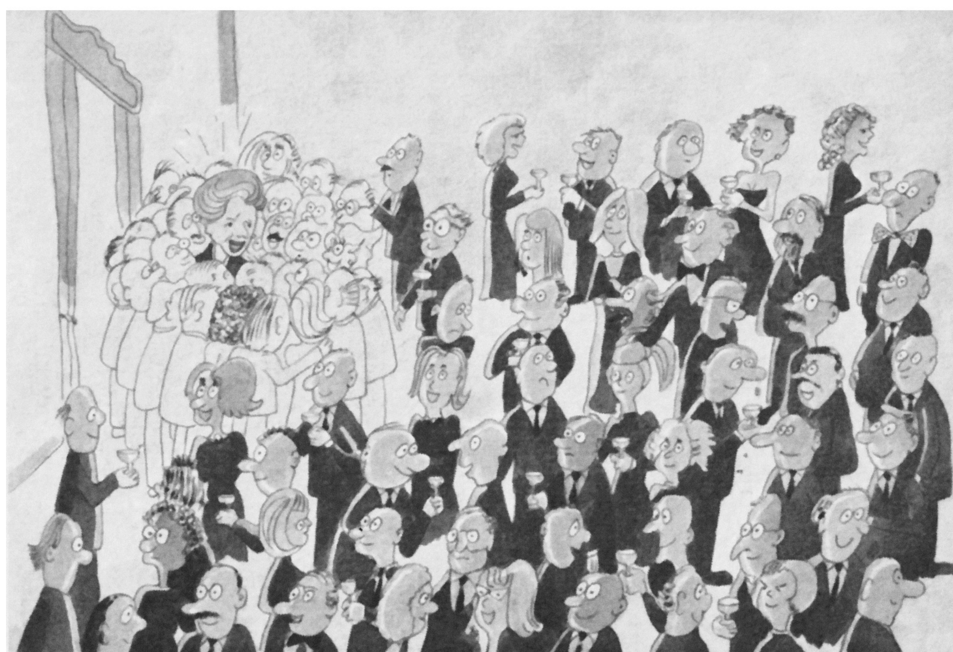


Figura 20. Explicația mecanismului Higgs folosită de David Miller în textul său câştigător. Pe măsură ce Margaret Thatcher îşi croieşte drum prin „câmpul“ activiştilor partidului, câmpul se acumulează în jurul ei şi înaintarea îi e încetinită. Această acumulare e echivalentă cu creşterea masei.

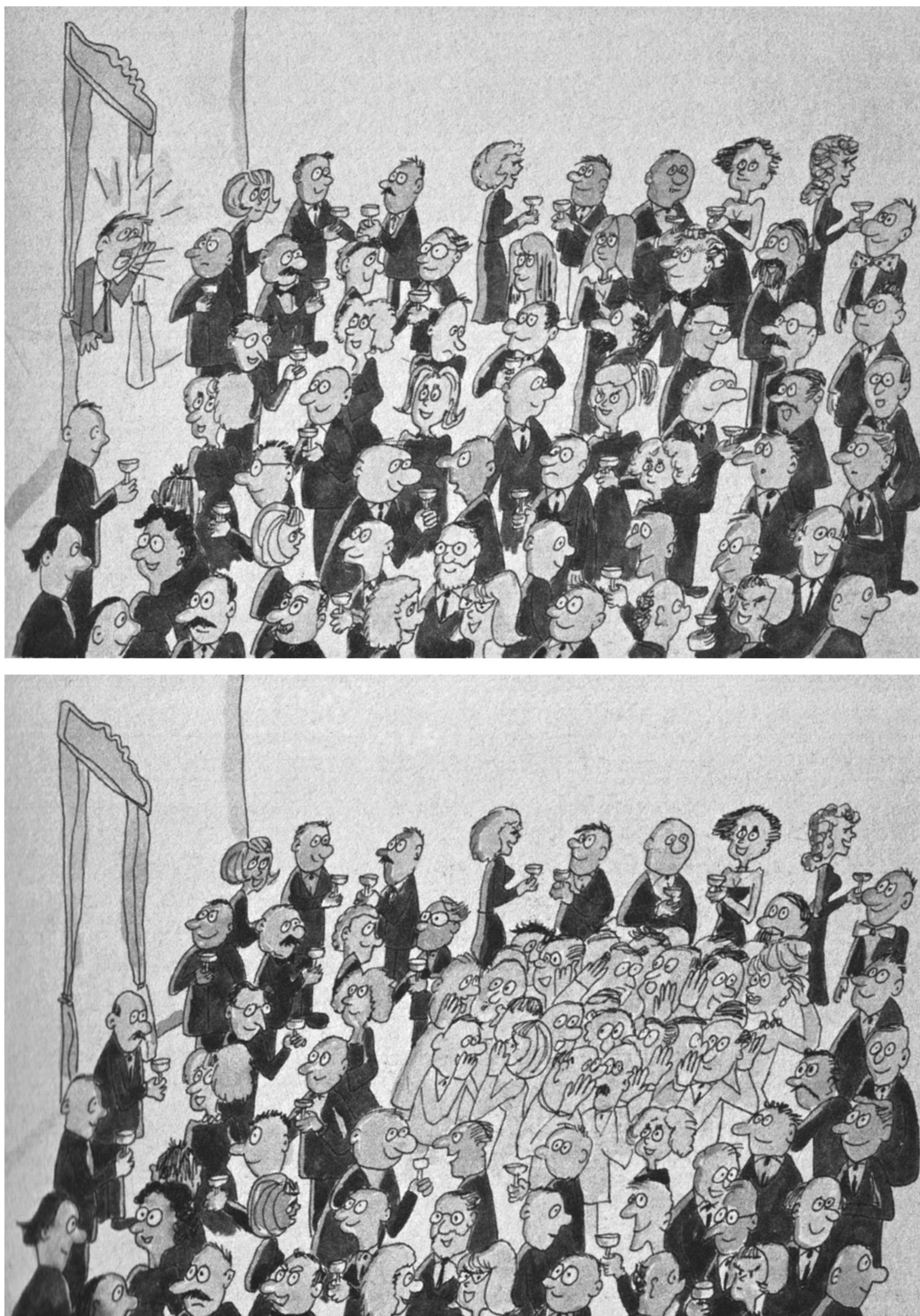


Figura 21. Bosonul Higgs e asemănător unui zvon rostit în şoaptă care îşi face drum prin „câmpul“ activiştilor partidului. Când aceştia se adună în grupuri pentru a auzi zvonul, se formează o „particulă“ localizată care se propagă apoi prin cameră.

> rețea, atomii sunt atraşi spre el, făcând ca masa efectivă a electronului să fie de până la de 40 de ori mai mare decât masa unui electron liber.
> Câmpul Higgs din vid, postulat de teorie, este un fel de rețea ipotetică ce umple tot universul. Avem nevoie de el, fiindcă altminteri nu putem explica de ce particulele Z şi W care transmit interacțiile slabe sunt atât de grele, în timp ce fotonul care transmite forțele electromagnetice are masă nulă.[2]

Aceasta explică mecanismul prin care particulele elementare fără masă (reprezentate în această analogie de doamna Thatcher) interacționează cu câmpul Higgs (distribuția uniformă a activiştilor partidului) şi astfel câştigă masă, după cum se arată în figura 20. Pentru a explica bosonul Higgs, Miller a continuat:

> Să considerăm acum un zvon care trece prin camera noastră plină de activişti ai partidului uniform răspândiți. Cei ce se află lângă uşă îl aud primii şi se îngrămădesc pentru a obține detalii, apoi se întorc şi se mişcă mai aproape de ceilalți vecini ai lor, care vor să afle şi ei. O undă de aglomerări de oameni trece prin cameră. Ea se poate răspândi în toate colțurile sau poate forma un mănunchi compact care transmite veştile de-a lungul unei linii de activişti de la uşă până la un demnitar din celălalt capăt al camerei. Deoarece informația e transmisă prin aglomerările de oameni şi, deoarece aglomerarea este cea care a dat o masă suplimentară fostului prim-ministru, rezultă că aglomerările care transmit zvonul au şi ele masă.
> Teoria prezice că bosonul Higgs este tocmai o asemenea aglomerare în câmpul Higgs. Ne va fi mult mai uşor să credem că acest câmp există şi că mecanismul de a da altor particule masă este adevărat dacă vedem efectiv însăşi particula Higgs. Se poate face iarăşi o analogie cu fizica solidului. O rețea cristalină poate transmite unde de aglomerări

periodice, fără a fi nevoie ca un electron să se deplaseze şi să atragă atomii. Aceste unde se comportă ca şi cum ar fi nişte particule. Se numesc fononi şi sunt şi ele bosoni. S-ar putea, de asemenea, să existe un mecanism Higgs, cu un câmp Higgs care umple tot universul, fără să existe însă şi un boson Higgs. Următoarea generație de acceleratoare va lămuri aceste lucruri.

Cele de mai sus sunt ilustrate în figura 21.

Waldegrave a primit 117 texte, ceea ce arată cât de importantă era căutarea bosonului Higgs pentru fizicieni. Au fost aleşi cinci câştigători, dar comunitatea fizicienilor a considerat că textul lui Miller era cel mai bun. Miller a fost încântat să primească sticla sa de Veuve Clicquot, dar se pare că n-a apucat s-o savureze. „Soția mea, cumnata mea şi prietena fiului meu au băut şampania", a zis el.[3]

Deşi foarte strâmtorat, guvernul britanic a continuat să-şi onoreze obligațiile asumate față de CERN.*

*

Goana după bosonul Higgs fiind temporar suspendată, mai erau alte câteva particule ale Modelului Standard care trebuiau găsite. Descoperirea cuarcului top a fost în cele din urmă anunțată la Fermilab, pe 2 martie 1995, de către două echipe de cercetare concurente, alcătuite din aproape 400 de fizicieni. El a fost identificat prin produşii săi de dezintegrare. Protonii şi antiprotonii energetici se ciocnesc producând o pereche top–antitop. Fiecare din aceste particule se dezintegrează într-un cuarc bottom

---

* Pentru a ne face o idee, contribuția Marii Britanii la bugetul CERN pe 2011 a fost de 15%, sau 109 milioane de lire sterline (174 de milioane de dolari), mai puțin de 2 lire pe an pentru fiecare cetățean al țării. „E efectiv o sumă infimă", spunea fizicianul Brain Cox, membru al colaborării ATLAS şi realizator TV. „De fapt, cheltuim aici mai mult pe alune decât pentru LHC" (*Sunday Times*, 27 februarie 2011). (*N. a.*)

şi o particulă W. O particulă W se dezintegrează într-un miuon şi un antineutrin miuonic. Cealaltă particulă W se dezintegrează într-un cuarc up şi un anticuarc down. Rezultatul final este o ciocnire care produce un miuon, un antineutrin miuonic şi patru jeturi provenind din cuarci. Pentru masa cuarcului top s-a găsit valoarea uimitoare de 175 GeV, de aproape 40 de ori mai mare decât masa partenerului său din generaţia a treia, cuarcul bottom.

În afara bosonului Higgs, singura particulă care rămânea să fie descoperită era neutrinul taonic. Descoperirea lui a fost anunţată la Fermilab după cinci ani, pe 20 iulie 2000. Era acum posibil să se reprezinte şirul interacţiilor produse de forţa slabă care schimbă aroma de la un cuarc la altul, ca în figura 22.

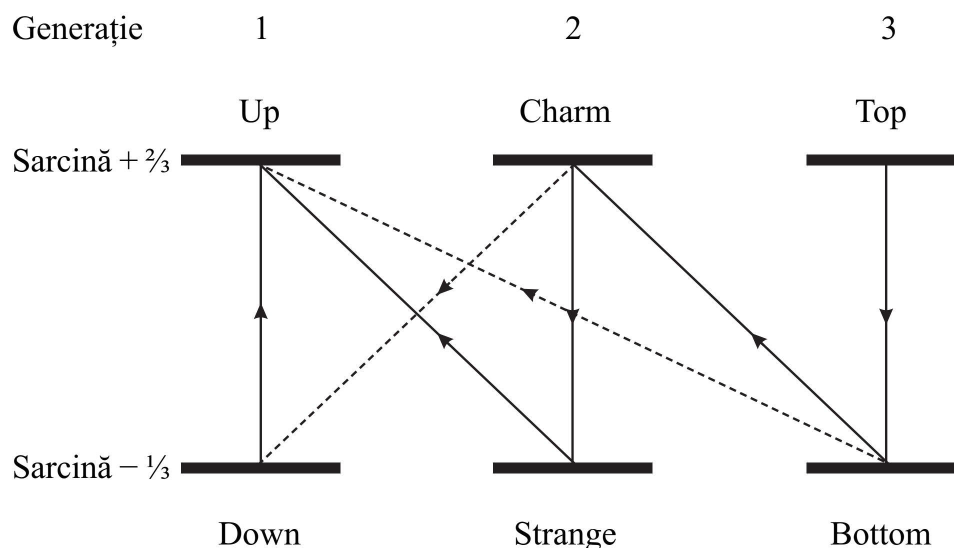


Figura 22. Dezintegrările dominante prin forţa slabă „care schimbă aroma" implicând cuarcii sunt: down→up, strange→up, charm→strange, bottom→charm şi top→bottom. Două căi de dezintegrare mai puţin probabile sunt indicate prin linii întrerupte: charm→down şi bottom →up. Tranziţiile de jos în sus implică emisia unei particule W^- care se dezintegrează într-un lepton (cum e electronul) şi antineutrinul corespunzător. Tranziţiile de sus în jos implică emisia unei particule W^+ care se dezintegrează într-un antilepton (cum e pozitronul) şi neutrinul corespunzător.

Mai exista speranța că Tevatronul sau LEP ar putea găsi bosonul Higgs, iar aceste instalații au fost împinse acum până la limitele lor. Problema era că masa bosonului Higgs nu poate fi prezisă cu o precizie rezonabilă. Spre deosebire de căutarea particulelor W şi Z, fizicienii nu prea ştiau încotro să se uite.

În genere se credea că el trebuie să aibă o masă de ordinul a 100–250 GeV. Putea fi detectat prin canalele sale de dezintegrare, care urmau să implice perechi bottom–antibottom în asociere cu cuarci top şi bottom, doi fotoni de energie înaltă, perechi de particule Z, care, la rândul lor, se dezintegrau în patru leptoni (electroni, miuoni şi neutrini), perechi de particule W şi perechi de leptoni tau.

LEP se dovedise a fi o instalație puternică şi adaptabilă, dar ajunsese la capătul vieții sale şi urma să fie dezafectat în septembrie 2000. În încercarea disperată de a găsi bosonul Higgs, fizicienii de la CERN împingeau acum instalația mult dincolo de limitele ei. Ea atinsese în august 1989 energia nominală per fascicul de 45 GeV (producând energii de ciocnire electron–pozitron de 90 GeV). Mai multe operațiuni de îmbunătățire ridicaseră energia de ciocnire la 170 GeV, dând posibilitatea de a genera perechi de particule W. În vara lui 2000, modificări suplimentare au împins energia la peste 200 GeV.

Pe 15 iunie 2000, fizicianul Nikos Konstantinidis de la CERN a studiat un eveniment care fusese înregistrat cu o zi în urmă de detectorul Aleph.* Conținea patru jeturi produse de cuarci, dintre care două proveneau din dezintegrarea unei particule Z. Celelalte două jeturi păreau să provină din dezintegrarea unei particule mai grele, cu o masă de aproximativ 114 GeV.

Toată lumea vedea în el un boson Higgs.

Evident, un singur eveniment nu constituie o descoperire, dar el a fost urmat rapid de încă două evenimente înregistrate de Aleph şi de două evenimente înregistrate de o altă colaborare,

---

* Aleph este acronimul de la Apparatus for LEP Physics [dispozitiv pentru studiul fizicii la LEP]. (*N. a.*)

numită Delphi.* Era tot insuficient pentru a anunța o descoperire, dar destul ca să-l convingă pe Luciano Maiani, director general la CERN, să prelungească funcționarea LEP până pe 2 noiembrie. Când al treilea detector, numit L_3, a înregistrat un tip diferit de eveniment, implicând pesemne dezintegrarea unui Higgs într-o particulă Z, care apoi se dezintegra în doi neutrini, se părea că CERN se afla în pragul uneia dintre cele mai importante descoperiri din fizica energiilor înalte de la inventarea bosonului Higgs, în 1964.

Fizicienii de la CERN cereau acum ca LEP să fie menținut în funcțiune pentru încă șase luni. Maiani părea înclinat să accepte cererea, dar, după o examinare critică minuțioasă într-o serie de reuniuni cu cercetători de prestigiu, a hotărât în cele din urmă că dovezile erau insuficiente pentru a justifica o eventuală întârziere în construcția LHC. Nu era posibilă o tranziție controlată, o comutare lină de la LEP la LHC pe o perioadă îndelungată. Pentru a construi LHC, tunelul care adăpostea LEP trebuia să fie complet golit. Maiani a simțit că era obligat să închidă LEP. Comunitatea CERN a aflat decizia dintr-un comunicat de presă.

Mulți fizicieni erau convinși că se aflau aproape de o descoperire importantă, iar felul în care tratase Maiani situația a lăsat un gust amar. Totuși, când evenimentele de ciocnire au fost supuse unor examinări suplimentare, probabilitatea ca ele să fi fost într-adevăr semnale reale ale bosonului Higgs s-a redus și mai mult. „Înțeleg nemulțumirea și tristețea celor care simt că erau gata să pună mâna pe bosonul Higgs“, scria Maiani în februarie 2001, „și se tem că ar putea trece ani până ce rezultatele lor să poată fi confirmate.“[4]

Singura concluzie a fost că bosonul Higgs trebuie să fie mai greu decât 114,4 GeV, cu o masă probabilă de aproximativ 115,6 GeV.

---

* Delphi este acronimul de la <u>De</u>tector with <u>L</u>epton, <u>P</u>hoton and <u>H</u>adron <u>I</u>dentification [detector pentru identificarea leptonilor, fotonilor și hadronilor]. (*N. a.*)

*

Odată cu descoperirea cuarcului top şi a neutrinului taonic, ansamblul particulelor elementare care alcătuiesc Modelul Standard era practic complet. Situaţia în care se ajunsese era fără precedent: nu existau date experimentale care să nu fie în acord cu predicţiile teoretice. Teoreticienii mai aveau însă multe de făcut.

Deficienţele grave ale Modelului Standard ieşiseră la iveală încă din momentul conceperii lui. Modelul conţine un număr alarmant de mare de particule „fundamentale“ sau „elementare“. Aceste particule sunt legate între ele într-un cadru care necesită 20 de parametri ce nu pot fi deduşi din teorie, ci trebuie măsuraţi. Din aceşti 20 de parametri, doisprezece stabilesc masele cuarcilor şi ale leptonilor, iar trei sunt necesari pentru a preciza intensităţile forţelor dintre ei.

Mai este apoi problema masei bosonului Higgs însuşi. El capătă masă prin aşa-numitele „corecţii de buclă“, care iau în considerare interacţiile lui cu particulele virtuale. Corecţiile de buclă care implică particule mai grele, cum este cuarcul top virtual, îi dau bosonului Higgs mult mai multă masă decât îşi poate permite să aibă dacă ruperea simetriei electroslabe are loc în modul acceptat. Rezultatul este că forţa slabă ar trebui să fie mult mai slabă decât este în realitate. Aceasta e aşa-numita „problemă a ierarhiei“.

Şi, în ciuda combinării reuşite a forţei slabe cu forţa electromagnetică realizată în cele din urmă de Glashow, Weinberg şi Salam, structura SU(3)×SU(2)×U(1) a teoriilor de câmp Yang–Mills care alcătuiesc Modelul Standard este departe de a fi o teorie complet unificată a forţelor dintre particule.

În lipsa unei orientări oferite de experiment, teoreticienii nu aveau altă soluţie decât să se ghideze după nişte principii estetice, urmându-şi instinctele în căutarea unor teorii care să treacă dincolo de Modelul Standard şi să explice legile naturii la un nivel şi mai profund.

Pe lângă teoriile marii unificări de tip Georgi–Glashow, o altă abordare a unificării a fost propusă la începutul anilor ’70 de teoreticienii din Uniunea Sovietică şi a fost redescoperită în mod independent în 1973 de fizicienii Julius Wess şi Bruno Zumino de la CERN. Ea se numeşte supersimetrie, adesea redusă la acronimul SUSY. Există o mare varietate de teorii supersimetrice, dar una dintre cele mai simple – propusă pentru prima oară în 1981 şi numită „modelul supersimetric standard minimal“ (cu acronimul MSSM) – conține „supermultipleți“ care unesc particulele de materie (fermionii) cu bosonii care transmit forțele dintre acestea.

În teoriile supersimetrice, ecuațiile sunt invariante la transformarea fermionilor în bosoni şi viceversa. Proprietățile foarte diferite ale fermionilor şi bosonilor în fizica pe care o observăm astăzi trebuie să fie atunci rezultatul faptului că supersimetria e ruptă sau ascunsă.

O consecință a acestei supersimetrii mai înalte e apariția unui număr exagerat de mare de noi particule. Pentru fiecare fermion, teoria prezice un partener supersimetric (numit sfermion), care este de fapt boson. Asta înseamnă că, pentru fiecare particulă din Modelul Standard, teoria prezice existența unui partener supersimetric masiv, diferența dintre spinii celor două particule fiind de ½. Partenerul electronului se numeşte selectron (o prescurtare de la *scalar-electron*). Fiecare cuarc are drept partener scuarcul corespunzător.

La fel, pentru fiecare boson din Modelul Standard există un partener supersimetric corespunzător, numit bosin, care e de fapt fermion. Partenerii supersimetrici ai fotonului şi ai particulelor W şi Z sunt fotinul, winul şi zinul.

Unul dintre avantajele MSSM este că rezolvă problema masei bosonului Higgs. În MSSM, corecțiile de buclă care fac ca masa bosonului Higgs să explodeze sunt compensate de corecțiile negative ce rezultă din interacțiile care implică particule virtuale supersimetrice. De exemplu, contribuția la masa lui Higgs care

provine din interacțiile cu un cuarc top virtual este anihilată de interacțiile care implică un scuarc stop virtual. Această compensare stabilizează masa bosonului Higgs şi, în consecință, şi intensitatea forței slabe. Pentru a face ca acest mecanism să funcționeze, MSSM necesită de fapt cinci particule Higgs, fiecare având altă masă. Trei dintre aceste particule sunt neutre, iar două au sarcină electrică.

Teoria MSSM corectează şi o altă problemă a Modelului Standard. După cum arătaseră Weinberg, Georgi şi Quinn în 1974, intensitățile forțelor tare, slabă şi electromagnetică ale Modelului Standard devin aproape egale la energii înalte. Dar ele nu devin riguros egale, după cum ne-am aştepta de la o teorie de câmp a unei forțe electro-nucleare complet unificate. În cadrul MSSM, se prezice că intensitățile celor trei forțe dintre particule converg într-un singur punct (vezi figura 23).

Supersimetria poate rezolva, de asemenea, o veche problemă din cosmologie. În 1934, astronomul elvețian Fritz Zwicky a descoperit că masa medie a galaxiilor din roiul Coma, dedusă din efectele lor gravitaționale, nu e în acord cu masa medie dedusă din luminozitatea galaxiilor pe cerul nopții. Aproape 90% din masa necesară pentru a explica efectele gravitaționale părea că e „absentă“ sau invizibilă. Această masă lipsă a fost numită „materie întunecată“.

Problema nu afecta doar un singur grup de galaxii. Materia întunecată este o componentă esențială a Modelului Standard al cosmologiei big bang, aşa-numitul model lambda-CDM. Observațiile succesive asupra radiației cosmice de fond efectuate de sateliții COBE şi, mai recent, WMAP, sugerează că materia întunecată constituie aproximativ 22% din masa-energia universului. Aproximativ 73% este „energie întunecată“, asociată cu un câmp de energie de vid răspândit peste tot, lăsând ca masa „vizibilă“ a universului (stele, neutrini şi elemente grele – materia din care suntem alcătuiți şi pe care o putem vedea) să contribuie cu mai puțin de 5%.

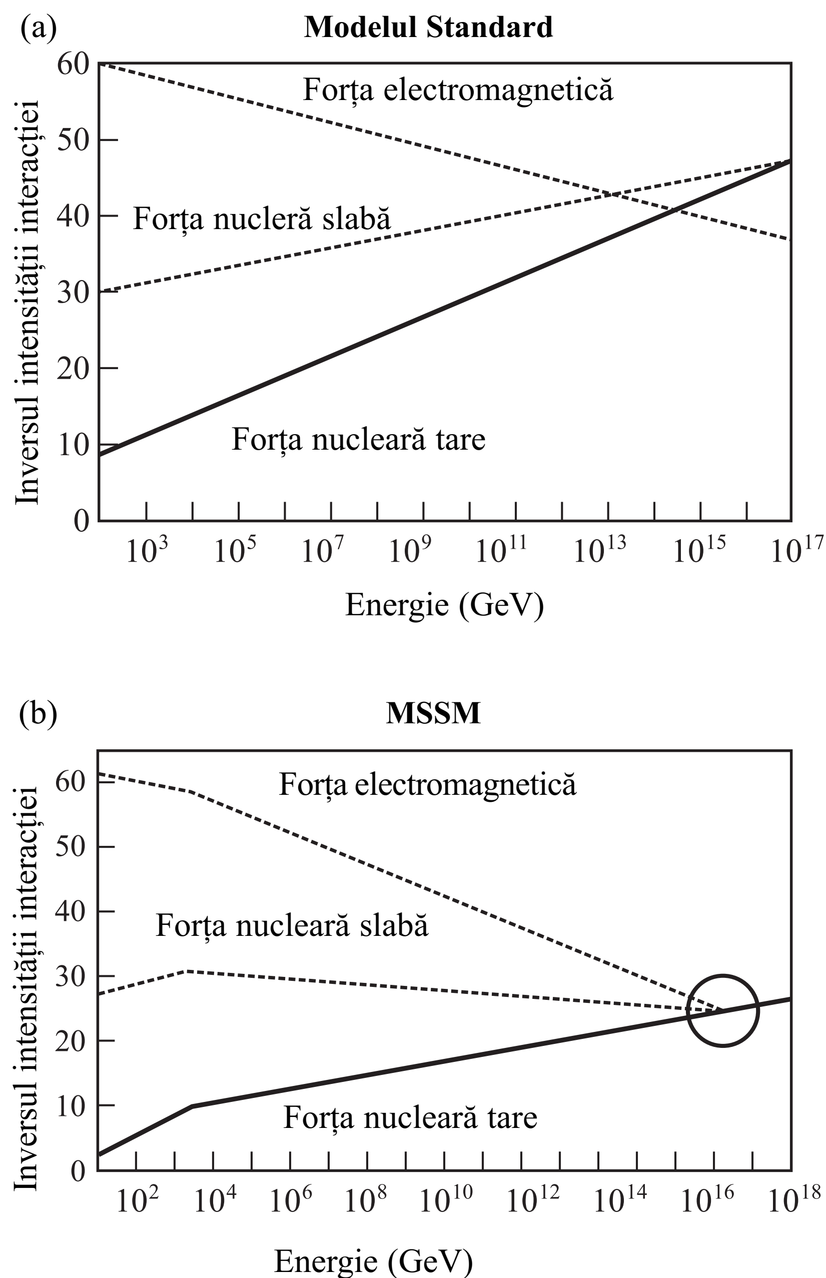


Figura 23. (a) Extrapolarea intensităților forțelor în Modelul Standard implică o energie (şi un moment de timp după big bang) la care forțele au aceeaşi intensitate şi sunt unificate. Forțele nu converg însă într-un singur punct. (b) În modelul supersimetric minimal (MSSM), câmpurile cuantice suplimentare modifică această extrapolare, iar forțele converg într-o măsură mai mare.

Supersimetria prezice superparticule care nu sunt afectate nici de forțele tari, nici de cele electromagnetice. Superparticule precum neutralinii sunt deci candidați pentru aşa-numitele particule masive care intracționează slab („weakly interacting massive particles", prescurtat WIMP), care se presupune că reprezintă o parte importantă din materia întunecată.*

Existența unei puzderii de particule supersimetrice poate părea de domeniul fantasticului, dar istoria fizicii particulelor e presărată cu descoperiri fantastice, bazate pe predicții teoretice pe care mulți le-au considerat absurde atunci când au fost făcute. Dacă există, unele dintre particulele supersimetrice se anticipează că îşi vor face apariția la energii de ordinul TeV-ilor.

Când LHC a început să prindă contur la peste 150 de metri adâncime sub solul francez şi cel elvețian, în primii ani ai noului mileniu, era evident că scopul său nu era numai să găsească bosonul Higgs electroslab, sau mai mulți bosoni Higgs, ori câteva particule supersimetrice prezise de MSSM. Era vorba de a împinge teoria dincolo de Modelul Standard; era vorba de capacitatea noastră de a înțelege din ce sunt alcătuite lucrurile şi cum au dat ele formă universului nostru.

*

Lucrările de demontare a LEP au început în decembrie 2000. Patruzeci de mii de tone de material trebuiau să fie îndepărtate. Tunelul a fost complet golit până în noiembrie 2001, când inginerii au stabilit primul dintre cele şapte sute de amplasamente pentru componentele LHC.

Au apărut inevitabil întârzieri. Maiani a anunțat depăşiri substanțiale ale costurilor în octombrie 2001, iar constrângeri bugetare ulterioare au amânat încheierea proiectului cu un an, din 2006 până în 2007. La fel cum constataseră şi americanii

* Neutralinii sunt formați din combinații de fotini, zini şi higgsini neutri. Vezi Kane, p. 158. (*N. a.*)

în timpul proiectului lor eşuat de contrucţie a SSC, noua tehnologie a magneţilor supraconductori tindea să înghită un buget mult mai mare decât se anticipase.

Construcţia celui mai mare sistem de refrigerare din lume, capabil să răcească magneţii supraconductori până la –271,4ºC, a fost încheiată în octombrie 2006. Ultimul dintre cei 1 746 de magneţi supraconductori ai LHC a fost instalat în mai 2007.

Deşi LHC urma să fie plasat în tunelul de 27 de kilometri care fusese folosit pentru LEP, lucrări de excavare suplimentare au fost necesare pentru a face loc noilor instalaţii de detecţie. În planificarea iniţială acestea erau: un dispozitiv LHC toroidal (A Toroidal LHC Apparatus, cu acronimul ATLAS), solenoidul compact pentru miuoni (Compact Miuon Solenoid sau CMS), un experiment de ciocnire a ionilor (A Large Ion Collider Experiment sau ALICE), destinat studiului ciocnirilor ionilor grei (nuclee de plumb), precum şi un dispozitiv (Large Hadron Collider beauty sau LHCb) proiectat anume pentru studiul fizicii cuarcului bottom.

Alte două instalaţii de detecţie, mult mai mici, au fost adăugate ulterior. Detectorul TOTEM (TOTal Elastic and diffractive cross-section Measurement) este destinat efectuării de măsurători de o precizie excepţională asupra protonilor şi e instalat lângă punctul în care protonii se ciocnesc în centrul detectorului CMS. În sfârşit, scopul detectorului LHCf (LHC forward) este să studieze particulele generate în regiunea „înainte" a ciocnirilor proton–proton, aproape pe direcţia fasciculelor iniţiale. El e plasat lângă detectorul ATLAS şi foloseşte acelaşi punct de intersecţie a fasciculelor ca acesta.

Detectorii cu destinaţie generală ATLAS şi CMS urmau să fie folosiţi în căutarea bosonului Higgs şi a unei „noi fizici" care să implice existenţa particulelor supersimetrice şi să rezolve misterul materiei întunecate. Detectorul ATLAS constă dintr-o serie de cilindri concentrici din ce în ce mai mari în jurul punctului în care se intersectează fasciculele de protoni din LHC.

Scopul detectorului intern este să înregistreze particule încărcate, să permită identificarea lor şi să le măsoare impulsul. Detectorul intern este înconjurat de o mare bobină magnetică supraconductoare de formă cilindrică, folosită pentru a devia traiectoriile particulelor încărcate.

În exterior sunt plasate calorimetrul electromagnetic şi cel hadronic, care absorb leptonii încărcaţi, fotonii şi hadronii, şi le determină energiile din avalanşa de particule pe care aceştia le creează. Un spectrometru pentru miuoni măsoară impulsul miuonilor de energie mare care străbat celelalte elemente ale detectorului. El foloseşte un câmp magnetic toroidal (în formă de covrig), creat de mari magneţi supraconductori constând din opt bobine în partea cilindrică şi două situate la extremităţi. Aceştia sunt cei mai mari magneţi supraconductori din lume (vezi figura 24).

Componentele ATLAS nu pot detecta neutrini, prezenţa lor fiind dedusă din dezechilibrul energetic dintre particulele care se ciocnesc şi cele detectate. Detectorul trebuie de aceea să fie „ermetic": nici o altă particulă în afară de neutrini nu poate scăpa nedetectată.

Detectorul ATLAS are aproximativ 45 de metri lungime şi o înălţime de 25 de metri, aproape jumătate din dimensiunile catedralei Notre Dame din Paris. Cântăreşte circa şapte mii de tone, echivalent cu Turnul Eiffel sau cu o sută de avioane Boeing 747 goale. Colaborarea ATLAS este condusă de un lider ales prin vot* şi constă din trei mii de fizicieni din peste 174 de universităţi şi laboratoare din 38 de ţări.

CMS are o structură diferită, dar performanţe asemănătoare. Detectorul intern este un sistem bazat pe pixeli şi benzi de siliciu care măsoară poziţiile particulelor încărcate şi permit

---

* Italianca Fabiola Gianotti a fost liderul colaborării ATLAS în perioada 2009–2013. Din 2013 lider este fizicianul britanic David Charlton. În primii 15 ani, colaborarea ATLAS a fost condusă de elveţianul Peter Jenni. (*N. t.*)

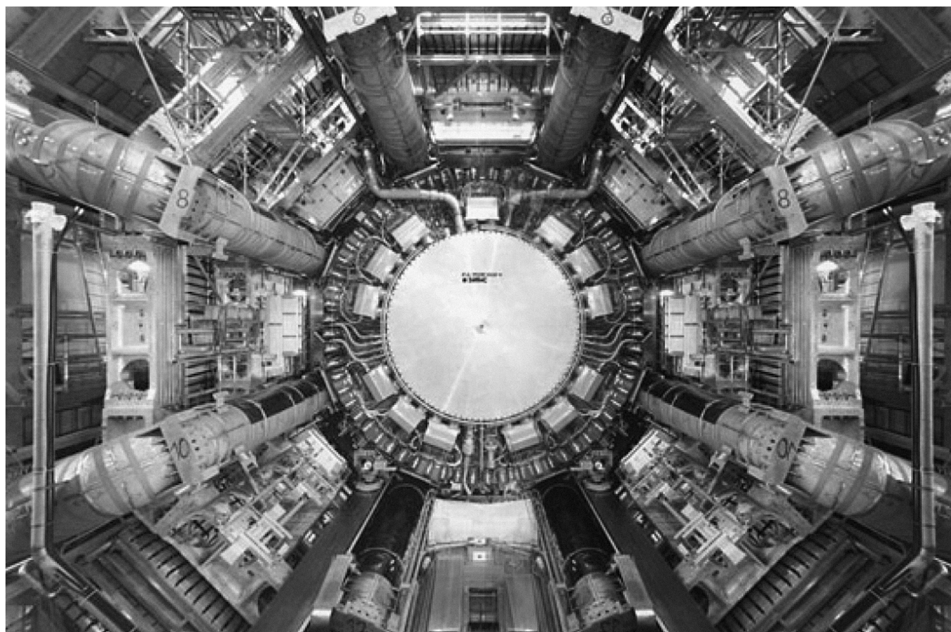


Figura 24. Detectorul ATLAS foloseşte un câmp magnetic toroidal (în formă de covrig) creat de un ansamblu de magneţi supraconductori uriaşi dispuşi în opt bobine centrale şi două situate la capete. Aceştia sunt cei mai mari magneţi supraconductori din lume.
Sursa: © copyright CERN

reconstruirea urmelor lor. Ca şi în detectorul ATLAS, calorimetrul electromagnetic şi cel hadronic măsoară energiile leptonilor încărcaţi, ale fotonilor şi ale hadronilor. Un spectrometru pentru miuoni captează datele privind miuonii care trec dincolo de calorimetre.

Detectorul CMS este „compact", ceea ce înseamnă că foloseşte un singur magnet supraconductor solenoidal, şi astfel e mai mic decât detectorul ATLAS. Totuşi, este destul de mare: 21 metri în lungine, 15 metri în lăţime şi 15 metri în înălţime (vezi figura 25). Site-ul CMS afirmă că e plasat într-o cavitate subterană „care i-ar putea adăposti pe toţi locuitorii Genevei, dar nu prea confortabil"[5]. Colaborarea CMS este condusă de un lider ales prin vot* şi include şi ea 3 000 de fizicieni şi ingineri din 183 de institute din 38 de ţări.

* Fizicianul italian Guido Tonelli a fost liderul colaborării CMS în perioada 2010–2011. El a fost urmat de Joseph Incandela în pe-

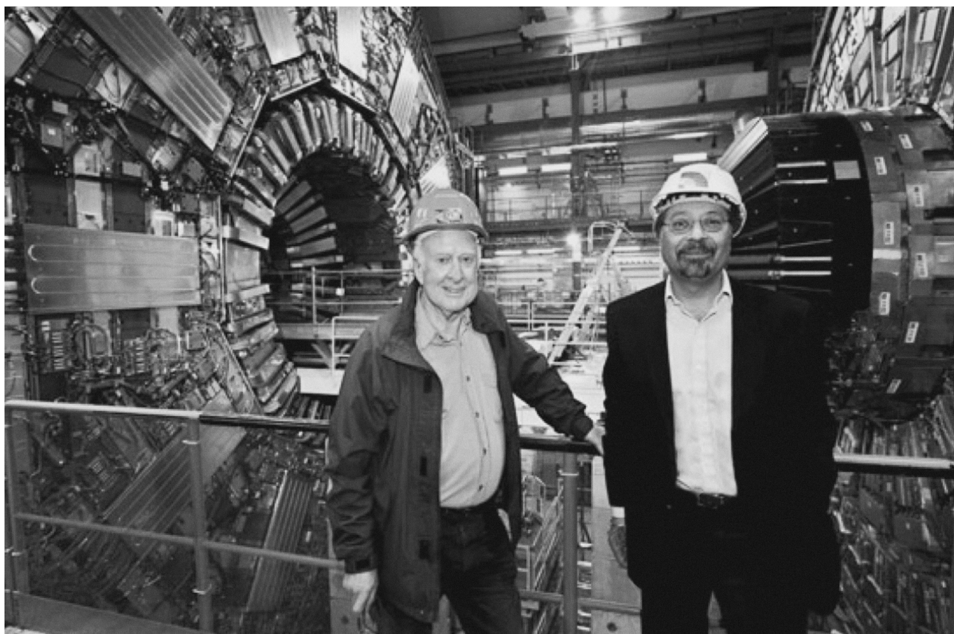


Figura 25. Peter Higgs (stânga) vizitând detectorul CMS în timpul fazei de construcție. El apare alături de purtătorul de cuvânt al colaborării CMS de la acea dată, Tejinder Virdee.
Sursa: © copyright CERN

Lucrările pentru construcția componentelor detectorilor ATLAS și CMS și pentru excavarea cavităților subterane care urmau să le adăpostească începuseră din 1997–1998. Asamblarea celor doi detectori s-a încheiat la începutul lui 2008.

În august 2008, toți cei 27 de kilometri ai LHC fuseseră răciți la temperatura lui de funcționare. Operația necesitase peste 10 000 de tone de azot lichid și 150 de tone de heliu lichid pentru a umple complet magneții.

LHC era gata de pornire.

*

„E un moment fantastic", declara pe 10 septembrie 2008 Lyndon Evans, directorul proiectului LHC. „Putem acum privi

---

rioada 2012–2013 și de Tiziano Camporesi începând cu ianuarie 2014. (*N. t.*)

cu încredere spre o nouă eră în înțelegerea originii şi evoluției universului."[6]

Din păcate, bucuria lui Evans nu avea să dureze. LHC a fost pornit la 10:28 am, ora locală. Fizicienii care umpleau până la refuz mica sală de control au aplaudat când un semnal luminos a apărut pe un monitor, indicând că protonii de viteză mare fuseseră distribuiți de-a lungul întregului inel de 27 de kilometri ai instalației, la o temperatură de doar două grade peste zero absolut. Deşi mai degrabă nespectaculos (şi cam dezamăgitor pentru miliardul de oameni care se estimează că au urmărit momentul la televizor), el reprezenta punctul culminant a două decenii de eforturi neprecupețite ale unor armate de fizicieni, proiectanți, ingineri şi muncitori.

Un alt fascicul de protoni a fost trimis de-a lungul inelului în direcție opusă la ora 3 pm, în aceeaşi zi. Problemele au început puțin mai târziu. După exact nouă zile, un circuit electric de legătură dintre doi magneți supraconductori a fost scurtcircuitat. A avut loc o descărcare electrică, producând o gaură în învelişul de heliu al magneților. Heliul gazos s-a scurs în sectorul 3–4 al tunelului LHC şi, în explozia care a urmat, 53 de magneți au fost distruşi, iar țevile prin care circulau protonii au fost contaminate cu funingine.

Nu se putea spera ca reparațiile să fie efectuate înainte de oprirea planificată pentru iarnă, şi o repornire a fost decisă în mod provizoriu pentru primăvara lui 2009. Dar au apărut alte probleme şi, la o reuniune de la Chamonix din februarie 2009, conducerea CERN a luat hotărârea să aprobe lucrări suplimentare.

Data repornirii a fost amânată.

CAPITOLUL 10

Întrebarea lui Shakespeare

În care LHC funcționează mai bine decât se aşteptau toți (cu excepția lui Lyn Evans), datele colectate într-un an sunt prelucrate în câteva luni, iar bosonul Higgs îşi face apariția din locurile unde se ascundea.

Abia la începutul lui septembrie 2009, la aproape un an de la prima pornire, a început procedura de răcire a ultimului sector din cele opt ale LHC. Toate cele opt sectoare au fost aduse din nou la temperatura lor de funcționare la finele lui octombrie, iar LHC a fost repornit în noiembrie. În ciuda costului crescut al electricității pe timpul lunilor de iarnă, acceleratorul a fost menținut în funcțiune toată iarna 2009–2010, în primul rând pentru ca fizicienii de la CERN să aibă un avans față de rivalii lor de la Tevatronul de la Fermilab, care produseseră şi ei câteva semnale incitante ce puteau fi atribuite bosonului Higgs.

În primele luni ale anului 2010, protonii care circulau de-a lungul LHC deplasându-se pe direcții opuse în cele două inele au fost accelerați până la 3,5 TeV, pentru a se ciocni apoi frontal unii cu alții. Primele ciocniri la 7 TeV au fost înregistrate pe 30 martie. Această energie de ciocnire a fost apoi menținută, iar intensitatea şi luminozitatea fasciculului au crescut treptat. Cei doi detectori ATLAS şi CMS au înregistrat evenimente ce puteau fi atribuite multor figuri familiare, întrucât particulele din colecția impresionantă a Modelului Standard, care fuseseră descoperite în decursul a peste şase decenii, erau acum înregistrate în doar câteva luni. Printre acestea se numărau pionul neutru, descoperit în 1950, mezonii eta, rho şi phi (formați din diverse combinații de cuarci up, down şi strange), mezonii J/ψ

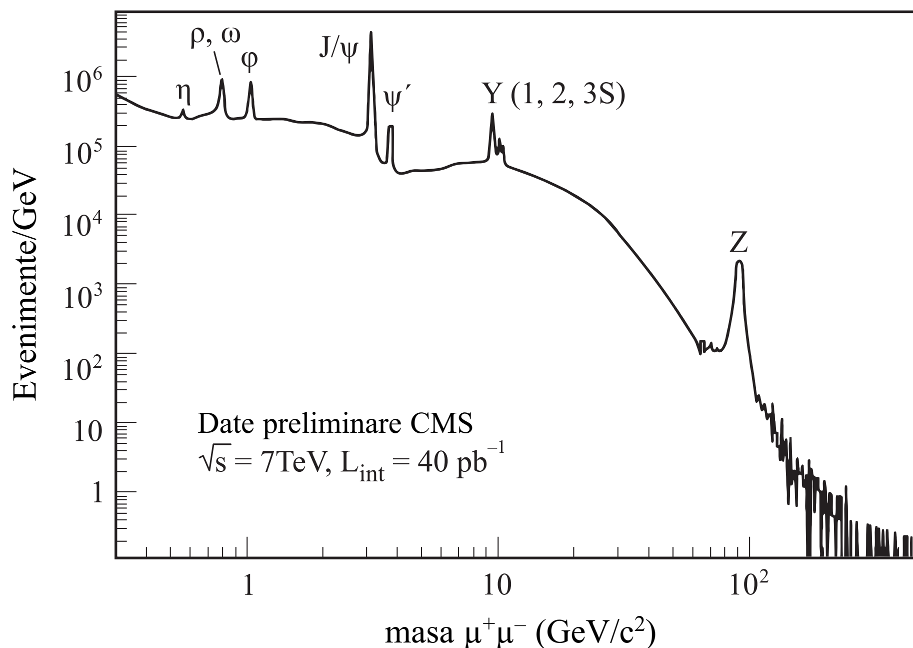


Figura 26. În 2010, în primele câteva luni de funcționare la 7 TeV, colaborările ATLAS şi CMS au înregistrat evenimente-candidat pentru întregul spectru cunoscut al particulelor Modelului Standard. Această diagramă a colaborării CMS prezintă dovezi clare pentru existența lui J/ψ, a lui upsilon (Υ, un mezon format dintr-un cuarc bottom şi antiparticula sa) şi a lui Z^0, puse în evidență prin producerea de perechi miuon–antimiuon de diverse energii.

şi upsilon, bosonii W şi Z (vezi figura 26). Până în iulie, au fost strânse date noi privind cuarcul top.

Pe 8 iulie 2010, fizicianul italian Tommaso Dorigo a postat pe blogul său un mesaj conținând zvonul că unele semne privind un boson Higgs uşor fuseseră descoperite la Tevatron. Zvonul s-a răspândit rapid pe Internet şi a fost preluat de agențiile de ştiri. El a fost aproape imediat negat de Fermilab într-un mesaj postat pe Twitter, care respingea „zvonurile difuzate de un blogger dornic de glorie“[1]. Dorido a căutat ulterior să justifice colportarea zvonurilor, susținând că „a menține fizica particulelor în centrul atenției cu aluzii la posibile descoperiri care ulterior nu se confirmă este mai important decât să vorbeşti tare şi răspicat o dată la zece ani, păstrând tăcerea în restul timpului“[2].

Întemeiate sau nu, zvonurile au fost simptomatice pentru rivalitatea tot mai mare dintre Fermilab şi CERN şi pentru senzația tot mai pregnantă că *ceva* ar putea fi curând descoperit. Lederman recunoscuse mai înainte că, dacă va trebui să vadă cum CERN anunță o nouă descoperire, va avea sentimente amestecate: „Ar fi ca şi cum soacră-ta s-ar prăbuşi de pe o stâncă la volanul BMW-ului tău“, a spus el.[3]

Postarea de pe blogul lui Dorigo se referise la zvonuri despre o dovadă la nivel de „trei sigma“, o măsură statistică ce reflectă gradul de încredere în datele experimentale.* Un semnal de trei sigma ar sugera un nivel de certitudine de 99,7% – cu alte cuvinte, o probabilitate de 0,3% ca datele să fie greşite. Deşi asemenea niveluri de certitudine par destul de convingătoare, fizicienii particulişti cer de obicei date de cinci sigma, sau niveluri de certitudine de 99,9999%, pentru a justifica anunțul unei „descoperiri“.

Era de aşteptat ca evenimentele de ciocnire care conduceau la producerea şi dezintegrarea bosonului Higgs să fie foarte rare, deci construirea unui set de date de cinci sigma necesita înregistrarea a numeroase ciocniri-candidat. Luminozitatea fasciculului de particule era prin urmare elementul crucial. Cu cât e mai mare luminozitatea, cu atât e mai mare numărul de ciocniri posibil candidate.** Într-adevăr, luminozitatea integrată (suma luminozității pe o perioadă de timp) este direct legată de numărul de ciocniri-candidat.

Luminozitatea integrată se exprimă în unitatea destul de obscură numită „inversul unui barn***“ sau „barn la puterea

* Evident, nu exista o astfel de măsură statistică pentru zvonul însuşi… (*N. a.*)

** Luminozitatea este o măsură a numărului de particule care pot fi înghesuite în punctul de ciocnire, deci a numărului de *ciocniri* potențiale. Nu toate particulele din punctul de ciocnire se vor ciocni în realitate. Luminozitatea indică însă probabilitatea ca un număr de ciocniri să aibă loc. (*N. a.*)

*** În engleză, *barn* înseamnă „hambar“. Vezi mai departe explicația denumirii. (*N. t.*)

minus unu“, scris ca barn^{-1}. Fizicienii măsoară ratele reacțiilor nucleare prin „secțiunile eficace de împrăştiere“, exprimate în centimetri pătrați. Ne putem închipui că secțiunea eficace de împrăştiere reprezintă mărimea unei „ferestre“ ipotetice bidimensionale prin care are loc reacția. Cu cât este mai mare fereastra, cu atât este mai probabilă reacția. Cu cât este mai probabilă reacția, cu atât mai rapid va decurge ea. Secțiunile eficace cunoscute au dimensiuni atomice, de regulă un număr înmulțit cu 10^{-24} cm^2. Secțiunile reacțiilor implicând atomi de uraniu erau atât de mari, încât un fizician din proiectul Manhattan a spus în glumă că sunt „mari cât un hambar“. Barnul a fost apoi introdus ca unitate. O secțiune cu valoarea dată de un număr înmulțit cu 10^{-24} cm^2 a devenit egală cu acel număr, dacă e exprimată în barni. Un picobarn este o miime de miliardime (10^{-12}) dintr-un barn, sau 10^{-36} cm^2. Un femtobarn este o milionime de miliardime (10^{-15}) dintr-un barn, sau 10^{-39} cm^2.

La o reuniune CERN de la Evian, Franța, din 8 decembrie 2010, Gianotti a trecut în revistă şansele de a descoperi bosonul Higgs şi natura competiției dintre LHC şi Tevatron. Un simplu calcul statistic a indicat că, chiar şi cu o luminozitate integrată de până la 10 femtobarni la puterea minus unu (10×10^{15} barn^{-1}, sau 10^{40} cm^{-2}) până la sfârşitul lui 2011 Tevatronul nu putea raporta mai mult decât un semnal la nivel de trei sigma pentru Higgs, în anumite intervale restrânse de energie. Mai puternicul LHC era în principiu capabil să genereze semnale la nivel de trei sigma la o luminozitate între 1 şi 5 femtobarni la puterea minus unu, depinzând de masa bosonului Higgs.

Pe 17 ianuarie 2011, Departamentul pentru Energie al SUA a anunțat că nu va finanța o extindere a programului Tevatronului după sfârşitul lui 2011. Această decizie n-a însemnat încetarea cursei pentru Higgs, dar era o recunoaştere a faptului că frontiera fizicii energiilor înalte trecuse din custodia Fermilab în cea a CERN.

În planul inițial de funcționare pentru LHC fusese prevăzută o oprire de lungă durată în 2012, necesară pentru a creşte

energiile fasciculelor de protoni, astfel încât să furnizeze energia nominală de ciocnire de 14 TeV.* Bosonul Higgs fiind pesemne atât de aproape, conducerea CERN a fost de acord în ianuarie 2011 să amâne oprirea şi să continue să opereze LHC la o energie de ciocnire de 7 TeV, în mod continuu, până în decembrie 2012. O posibilă creştere a energiei de ciocnire până la 8 TeV a fost considerată prea riscantă. În schimb, urmau să fie aplicate măsuri pentru a spori luminozitatea fasciculului.

„Dacă natura este bună cu noi şi particula Higgs are masa în domeniul actual de energii al LHC“, spunea despre această decizie Rolf Heuer, directorul general al CERN, „am putea avea destule date în 2011 pentru a vedea unele semne, dar nu destule pentru o descoperire. Funcţionând pe tot parcursul anului 2012, vom avea datele necesare pentru a transforma aceste semne într-o descoperire.“[4]

Scena era pregătită.

*

Secretara lui Einstein, Helen Dukas, l-a întrebat odată dacă i-ar putea da o explicaţie simplă a relativităţii, pe care s-o poată folosi ca răspuns la numeroasele întrebări primite de la reporteri. Einstein s-a gândit un timp şi a propus: „O oră în care stai cu o fată drăguţă pe o bancă în parc trece ca un minut, dar un minut de stat pe o sobă încinsă pare o oră.“[5]

În rândul miilor de oameni de ştiinţă implicaţi în colaborările de la Fermilab şi CERN, tensiunea şi emoţia erau acum vizibile. De peste un deceniu nu mai fusese descoperită o particulă. Trecuseră aproape unsprezece ani de când Higgs-ul fusese „întrezărit“ la acceleratorul LEP. Iar acum promisiunea unei fizici noi era teribil, chinuitor de aproape. Cât mai aveau de

---

* Oprirea era necesară pentru a fi demontate aproximativ 27 000 de circuite de legătură dintre magneţii supraconductori principali, care urmau să fie reparate şi conectate între ele astfel încât să suporte curenţii mai intenşi necesari pentru a se produce 7 TeV pe fascicul. (*N. a.*)

aşteptat? Şase luni? Un an? Doi ani? În mod clar se aflau pe teritoriul „sobei încinse“.

A fost poate inevitabil ca barajul să se rupă.

Peter Woit, specialist în fizică matematică la Universitatea Columbia, menţinuse un blog de fizica energiilor înalte după publicarea în 2006 a cărţii sale de succes *Nu-i nici măcar greşită* (*Not Even Wrong*), o critică a teoriei moderne a corzilor*. Pe 21 aprilie el a primit o postare anonimă care conţinea rezumatul unei note interne ATLAS. Textul susţinea că se găsise un semnal de patru sigma pentru un boson Higgs cu o masă de 115 GeV.

Nu era o farsă. Lucrarea aparţinea unei mici echipe de fizicieni din ATLAS, de la Universitatea Wisconsin-Madison, condusă de Sau Lan Wu, care făcuse parte din colaborarea Aleph ce „întrezărise“ Higgs-ul în anul 2000, la sfârşitul funcţionării LEP. Nu era deci o coincidenţă faptul că Wu revenise la domeniul de energii unde credea că văzuse acele semnale preliminare.

Existau însă două probleme. Prima era de natură fizică. Particula fusese observată în aşa-numita distribuţie de masă difotonică dintr-un total combinat de circa 64 picobarni^{-1} de date adunate în 2010 şi la începutul lui 2011.

La o energie de 7 TeV, ciocnirile proton–proton care au loc în LHC implică în realitate ciocniri cuarc–cuarc şi procese de fuziune a gluonilor care, în teorie, pot produce bosoni Higgs. Canalele de dezintegrare deschise pentru Higgs depind de masa sa. Pentru o masă mare, canalele de dezintegrare implicând producerea a două particule W sau a două particule Z vor fi posibile. Dar pentru un Higgs cu masa joasă de 115 GeV nu există energie suficientă pentru a se atinge aceste canale. În acest caz, bosonul Higgs se dezintegrează pe alte căi. Una dintre acestea implică producerea a doi fotoni de energie înaltă, proces scris ca $H \rightarrow \gamma\gamma$. Problema era că rezonanţa observată era de aproximativ 30 de ori mai frecventă decât prevedea Modelului Standard pentru acest canal de dezintegrare.

---

* În original *string theory*. (*N. t.*)

Dezintegrarea bosonului Higgs în doi fotoni este dominată în Modelul Standard de aşa-numitele „bucle“ de bosoni W, implicând producția şi anihilarea ulterioară a acestor bosoni.* Ideea e că această cale de dezintegrare are loc, conform predicțiilor, foarte rar, reprezentând numai circa 0,2% din toate căile posibile de dezintegrare. Dacă acesta era într-adevăr bosonul Higgs, atunci dezintegrarea lui în doi fotoni era dintr-un motiv oarecare mult amplificată. Alte particule noi, de pildă cuarci şi leptoni din a patra sau chiar a cincea generație, ar fi trebuit să fie invocați ca explicație.

A doua problemă privea statutul descoperirii. Documentul difuzat era o notă internă ATLAS de tip comunicare, sau „COM“ – destinată unei distribuiri rapide pentru ca rezultatele care nu erau încă suficient de minuțios examinate şi aprobate să fie discutate în cadrul colaborării. În nici un caz el nu putea fi interpretat drept un punct de vedere „oficial“ al grupului ATLAS. Verificări şi analize ulterioare puteau elimina cu totul acest rezultat, cu mult înainte ca vreun articol oficial să fie scris.

Vestea despre nota COM apărută prin scurgere de informații a lovit „blogosfera“ exact înainte de weekendul prelungit de Paşti şi, timp de câteva zile, discuția s-a limitat la utilizatorii din domeniul fizicii energiilor înalte şi cei interesați de subiect. În 2009 Dorigo prezisese că vestea descoperirii Higgs-ului va apărea mai întâi pe un blog. El a simțit că predicția îi fusese confirmată, dar avea mari îndoieli că acesta era chiar bosonul Higgs, şi a pariat pe 1 000 dolari contra 500 că datele suplimentare nu vor indica o nouă particulă de 115 GeV în canalul de dezintegrare cu doi fotoni finali.

Povestea a fost preluată de principalele agenții de ştiri britanice în duminica Paştelui, pe 24 aprilie. Jon Butterworth, un fizician din colaborarea ATLAS afiliat la University College

* Un alt proces virtual, reprezentat tot printr-o buclă, implică formarea şi anihilarea ulterioară a unei perechi fermion-antifermion, contribuția dominantă fiind cea a cuarcului top. (*N. t.*)

din Londra, a prezentat un raport echilibrat pentru postul de televiziune Channel 4 din Marea Britanie. El a spus: „Ce s-a întâmplat aici e că un grup de oameni au petrecut patru nopți fără somn. Ei au făcut câteva grafice şi s-au entuziasmat excesiv [şi] le-au trimis sub formă de notă internă colaborării. Ceea ce e în regulă. Toată lumea e surescitată acolo, dar, din păcate s-a produs o scurgere de informații. E un loc aflat în fierbere în momentul de față.“[6] Informația a fost prezentată pe larg în ziare a doua zi.

În blogul său pentru ziarul *Guardian*, Butterworth a dezvoltat această temă: „Să păstrezi o atitudine ştiințifică detaşată e uneori dificil. Şi, dacă noi înşine nu ne putem păstra mereu capul limpede, nu e de mirare că oamenii din afară ajung şi ei să se ambaleze. Din acest motiv avem o verificare internă continuă, echipe separate care lucrează la aceeaşi analiză, referenți de specialitate externi, experimente repetate şi aşa mai departe.“[7]

Zvonuri contrare nu au întârziat să apară. Un blog francez de fizica energiilor înalte a pretins pe 28 aprilie că, examinând mai multe date, fizicienii din ATLAS au constatat că semnalele Higgs-ului au dispărut rapid. Pe 4 mai, David Stiga, reporter la *New Scientist*, a postat online o ştire în care susținea că văzuse un document neoficial provenind din colaborarea CMS care arăta că o cercetare a datelor se soldase cu un rezultat nul.[8] Din asemenea scurgeri de informații un observator interesat putea întrezări mişcările haotice înainte şi-napoi care aveau loc acum în colaborările ATLAS şi CMS.

Pe 8 mai, colaborarea ATLAS a făcut un anunț oficial. Analiza completă a unui total de 132 picobarni^{-1} folosind datele din 2010 şi 2011 nu produsese într-adevăr nimic relevant; distribuția de masă difotonică nu indica nici un exces de evenimente. Într-o postare ulterioară pe blog, Butterworth a explicat că acest rezultat nul nu era deloc surprinzător: chiar şi predicțiile Modelului Standard sugerau că nu era încă nimic de văzut, dar că

ceva ar putea apărea „cât de curând". „Rămâneți deci preocupați de spectrul de masă difotonic", scria el, „dar așteptați să apară rezultate sigure înainte să deschiți sticla de șampanie."[9]

Se pare că n-a trebuit să așteptăm prea mult. Pe 22 aprilie, la miezul nopții, LHC a atins un nou record mondial privind luminozitatea instantanee, de $4{,}67 \times 10^{32}$ cm^{-2} s^{-1}, sau 467 microbarni (o milionime dintr-un barn) la puterea minus unu pe secundă. Inginerul de serviciu în acea seară, Laurette Ponce, vizitase CERN când era copil și revenise în laborator în 1999 pentru studii de doctorat. „Niciodată nu mi-am imaginat că într-o zi voi apăsa butonul care va stabili recordul LHC-ului", a mărturisit ea.[10]

Fiindcă era miezul nopții, în camera de control de la CERN erau puțini cei care asistau la acest moment. Ponce a strigat de bucurie și a dansat, fluturându-și brațele în aer ca o adolescentă.

Această creștere spectaculoasă în luminozitate fusese atinsă injectând din ce în ce mai multe mănunchiuri de protoni din SPS în fiecare fascicul care se deplasează de-a lungul LHC-ului. Pe 3 mai, luminozitatea de vârf a fost crescută și mai mult, până la 880 $microbarni^{-1}$ pe secundă, cu 768 de pachete de protoni per fascicul. Spre sfârșitul lunii mai s-a înregistrat o luminozitate de vârf de 1 260 $microbarni^{-1}$ pe secundă.

Pentru comparație, secțiunea eficace pentru ciocniri inelastice proton–proton la 7 TeV este de circa 60 milibarni, sau 0,06 barni. O luminozitate instantanee de 1 260 $picobarni^{-1}$ pe secundă implică deci $1260 \times 10^6 \times 0{,}06$, adică peste 7*5 de milioane de ciocniri pe secundă*. Dacă presupunem că secțiunea de producere a bosonului Higgs la 7 TeV este de 9 picobarni*,

* Această valoare e bazată pe recomandările pentru energia de ciocnire de 7 TeV făcute de grupul de lucru privind bosonul Higgs la LHC. Secțiunile calculate de producere a bosonului Higgs prin fuziune gluon–gluon variază, depinzând de masa Higgs-ului, de la circa 19 picobarni la 115 GeV până la o valoare de circa 3 picobarni la 250 GeV. Media pe acest interval de masă este de aproximativ 9 picobarni. (*N. a.*)

atunci această luminozitate instantanee implică $1260\times10^{6}\times 9\times10^{-12} = 0{,}011$ bosoni Higgs pe secundă, sau *un boson Higgs produs în medie la fiecare 90 de secunde*.

Scandalul scurgerii de informații făcuse să se pună problema modului în care un rezultat „bombă“ trebuia să fie anunțat oficial. James Gillies, şeful departamentului de comunicare al CERN, a explicat pentru *New Scientist* că orice asemenea rezultat va fi mai întâi discutat şi aprobat în cadrul colaborării care l-a găsit (ATLAS sau CMS), înainte de a fi comunicat directorului general CERN. El va fi comunicat apoi celeilalte colaborări, pentru ca rezultatul să poată fi confirmat. Apoi vor fi anunțați şefii altor laboratoare şi statele membre individuale care contribuie la finanțarea CERN. Anunțul se face apoi în cadrul unui seminar organizat la CERN. Dar până atunci multe mii de oameni ar fi deja în posesia informației. O altă scurgere de informații părea nu numai posibilă, ci aproape inevitabilă.

Aşadar, unde se va rupe din nou barajul?

Pe 17 iunie, LHC furnizase deja fiecărei colaborări cantitatea record de 1 femtobarn^{-1} de date, obiectiv care fusese prevăzut pentru tot anul 2011. „Nu cred că ne-am fixat ținta prea jos“, a explicat Heuer în discursul său de la mijlocul anului către personalul CERN. „Cred că ne-am fixat ținta în mod realist, dar nu optimist. Iar eu, un optimist înnăscut, trebuie să spun acum că maşina a funcționat mai bine decât ne aşteptam.“[11]

Dar pentru Lyn Evans nu era nici o surpriză. „LHC lucrează mult mai bine decât se aştepta oricine, cu excepția mea“, a declarat el. „Sunt foarte fericit.“[12] Evans venise la CERN în 1969 şi participase la proiectul LHC încă de la naşterea lui, în 1984, la reuniunea de la Lausanne. El condusese proiectul începând cu 1993. Trecuse prin multe experiențe emoționante.

Cu atât de multe date furnizate acum detectorilor ATLAS şi CMS, aşteptările au crescut la cote neatinse până atunci. Existau suficiente date pentru a furniza o dovadă la nivel de trei sigma în favoarea unui boson Higgs în intervalul de masă 135–475

GeV. Dar şi pentru a exclude Higgs-ul cu un nivel de certitudine de 95% din intervalul 120–530 GeV. Punând ca limită sfârşitul lui 2012, se aprecia că problema va fi tranşată, într-un fel sau altul.

„După părerea mea, întrebarea lui Shakeaspeare pentru Higgs – a fi sau a nu fi – va avea un răspuns la sfârşitul anului viitor“, a spus Heuer.[13]

Toată atenția s-a îndreptat acum către conferința în domeniul energiilor înalte a Societății Europene de Fizică (European Physical Society – EPS), programată să înceapă pe 21 iulie la Grenoble.

*

Reuniunea EPS avea să fie prima ocazie pentru colaborările ATLAS şi CMS de a arăta ce găsise fiecare din ele cu 1 femtobarn^{-1} de date. Faptul că puteau prezenta rezultate la doar câteva săptămâni după colectarea datelor era o mărturie a muncii intense şi a devotamentului a sute de fizicieni care lucraseră neobosit – şi cu puține ore de somn – la analiză.

A devenit evident că bosonul (sau bosonii) Higgs – admițând că există – nu putea fi „găsit“ ca atare. În schimb, anumite intervale posibile pentru masă aveau să fie eliminate, îngustându-se căutarea la intervale de masă din ce în ce mai mici, până când, în cele din urmă, bosonul Higgs nu va mai avea unde să se ascundă.

Colaborarea ATLAS putea exclude acum, cu un nivel de certitudine de 95%, un boson Higgs al Modelului Standard cu masa în intervalele 155–190 GeV şi 295–450 GeV. În sine, acesta era deja un rezultat important. Faptul că nu se găsise nimic într-un interval de energii atât de mare ridica unele probleme de ordin teoretic; majoritatea vizau fizica de dincolo de Modelul Standard.

Dar mai era ceva. Datele prelucrate de ATLAS indicau şi un exces de evenimente peste fond, între 120 şi 145 GeV. Acesta se putea datora câtorva cauze, cum sunt de exemplu erorile

analizei, fluctuațiile fondului, evenimentele care nu au fost corect anticipate sau calculate, sau incertitudinile sistematice din detector. Dar excesul putea fi şi primul indiciu că ceva asemănător cu bosonul Higgs al Modelului Standard (sau poate chiar mai mulți bosoni Higgs) stătea ascuns (stăteau ascunşi) în acest interval de energie.

Excesul era dominat de evenimente care puteau fi asociate cu două canale de dezintegrare a Higgs-ului. Acestea implicau un boson Higgs dezintegrându-se în două particule W, deci în final în doi leptoni încărcați şi doi neutrini (proces scris ca $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell^+\nu\ell^-\nu$)*, cu o contribuție mai mică din canalul în care un Higgs se dezintegrează în două particule Z^0, deci în final în patru leptoni încărcați (proces scris ca $H \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$).** Primul era de aşteptat să fie unul din canalele dominante pentru un boson Higgs al Modelului Standard de masă suficientă, dar, desigur, neutrinii şi antineutrinii astfel produşi trebuiau deduşi în mod indirect, deoarece nu puteau fi detectați, de aceea era foarte greu să se distingă evenimentele Higgs autentice de fond. În consecință, doar un interval de mase pentru Higgs a putut fi dedus pe baza datelor din acest canal.

Al doilea canal este mult mai curat. De fapt, acesta este canalul „de aur“, numit astfel deoarece e aproape complet necontaminat de evenimente de fond şi furnizează astfel o măsurare a masei bosonului Higgs care poate fi în principiu foarte precisă. Procesul este şi foarte rar, doar unul dintr-o mie de bosoni Higgs dezintegrându-se astfel.

Excesul de evenimente observat în datele ATLAS combinate era de doar 2,8 abateri standard, sau 2,8 sigma, peste fond. Nu

* Leptonii încărcați şi neutrinii se produc în anumite combinații. De exemplu, o particulă W^- se va dezintegra într-un electron sau un miuon şi antineutrinul corespunzător, iar o particulă W^+ se va dezintegra într-un pozitron sau un antimiuon şi neutrinul corespunzător. (*N. a.*)

** Din nou, leptonii se produc în combinații fixe: electronii cu pozitronii, miuonii cu antimiuonii. (*N. a.*)

era nici măcar o „dovadă“ la nivel de trei sigma şi era departe de cele cinci sigma necesare pentru a declara o descoperire. Era totuşi un indiciu serios. Dar ce găsise CMS-ul?

Colaborarea CMS a anunțat zone excluse cu un nivel de certitudine de 95% în intervalul 149–206 GeV, o mare parte din regiunea 200–300 GeV şi în intervalul 300–440 GeV. Datele CMS combinate indicau şi ele un exces interesant, care se dovedise dificil de evaluat, dar era puțin mai mic decât ce găsise colaborarea ATLAS.

Veştile erau electrizante. Colaborările ATLAS şi CMS, care înainte de conferință lucraseră separat, în secret şi în competiție una cu alta, găsiseră ambele cam acelaşi lucru.

Mai era încă un drum lung de parcurs. După prezentări, câțiva membri ai colaborărilor ATLAS şi CMS s-au strâns pentru a sărbători cu şampanie şi a discuta paşii următori. Un mic grup de lucru urma să se reunească pentru a combina rezultatele celor două colaborări şi a le completa cu noi date, astfel încât să se obțină o evaluare mai precisă.

LHC a continuat să-şi doboare propriile recorduri. Pe 30 iulie el a atins un vârf de luminozitate de 2 030 microbarni^{-1} pe secundă (peste 120 milioane de ciocniri proton–proton pe secundă). În ciuda unor probleme de stabilitate, pe 7 august acceleratorul furnizase fiecărei colaborări o cantitate de date de peste 2 femtobarni^{-1}. Era deja dublul volumului de date care fusese analizat şi prezentat la conferința EPS.

Rezultatele combinate şi actualizate urmau să fie gata la timp pentru următoarea mare conferință de vară, al XV-lea Simpozion Internațional privind Interacțiile Lepton–Foton la Energii Înalte, programat să înceapă pe 22 august la Institutul Tata din Mumbai, India.

Se părea că răspunsul la întrebarea lui Shakespeare putea sosi în câteva luni.

*

Einstein a afirmat odată: „Dumnezeu e subtil, dar nu e răutăcios.“* Deşi capitolul următor din saga căutării bosonului Higgs nu pare să trădeze existenţa unei divinităţi excesiv de răutăcioase, din felul în care s-au derulat evenimentele am fi îndreptăţiţi să-l acuzăm pe Dumnezeu ca e oarecum maliţios.

În săptămânile dinaintea conferinţei de la Mumbai, în blogosferă a început să circule zvonul că datele combinate ATLAS şi CMS vorbeau acum mult *mai puţin* ambiguu de un boson Higgs cu o masă de aproximativ 135 GeV. Se părea că datele combinate sugerau un exces de evenimente de dezintegrare a bosonului Higgs cu un nivel de semnificaţie mult mai mare decât trei sigma. Aşteptarea devenea tot mai încordată. Deşi o dovadă de trei sigma nu avea să reprezinte o „descoperire“, se putea judeca după încrederea fizicienilor aflaţi cel mai aproape de rezultate dacă ei credeau că era vorba într-adevăr despre „el“.

M-am întâlnit cu Peter Higgs în Edinburgh, într-o după-amiază ploioasă de joi, cu câteva zile înainte de începerea conferinţei de la Mumbai. Higgs se pensionase în 1996, dar rămăsese apropiat de departamentul Universităţii Edinburgh, unde începuse să lucreze în 1960 ca lector de fizică matematică. Acum era un bătrânel vioi de 82 de ani. Am stat într-o cafenea împreună cu colegul şi prietenul său Alan Walker şi am vorbit despre experienţele prin care trecuse şi despre speranţele pe care şi le făcea pentru viitorul apropiat.

Higgs publicase articolul care avea să-l lege pe vecie de particula care-i poartă numele în 1964.** Aşteptase timp de 47 de ani o confirmare. Am vorbit despre ce urma să se întâmple

---

* Cuvintele „*Raffiniert ist der Herr Gott. Aber boshaft ist Er nicht*“ sunt cioplite în piatră deasupra şemineului într-o cameră din Fine Hall, la Universitatea Princeton, în memoria lui Einstein. (*N. a.*)

** Dar particula pe care a prezis-o e cunoscută sub numele de „boson Higgs“ abia din 1972. (*N. a.*)

la conferința de la Mumbai și despre șansele ca ceva important să fie raportat acolo. „Mi-e greu acum să mă confrunt cu cel care eram pe-atunci [în 1964]“, a explicat el. „Dar mă simt ușurat că se ajunge la un deznodământ. Ar fi frumos ca, după tot acest timp, ideea să se dovedească a fi corectă.“[14]

Găsirea bosonului Higgs avea să fie în mod inevitabil răsplătită cu un Premiu Nobel pentru mecanismul Higgs, și se purtaseră discuții aprige privind aceia dintre fizicienii implicați – Englert, Higgs, Guralnik, Hagen și Kibble – care vor recunoscuți de Comitetul Nobel.* Am vorbit despre valul de publicitate care urma probabil să însoțească un anunț pozitiv ferm la Mumbai și orice anunț ulterior din partea Academiei Suedeze. Biroul de presă al Universității Edinburgh avea să fie extrem de activ. Și, dacă lucrurile vor scăpa de sub control, Higgs își va închide pur și simplu telefonul și va refuza să răspundă când cineva o să sune la poartă.

Dar se pare că nu era încă nevoie de asemenea măsuri extreme. Când conferința de la Mumbai a început în lunea următoare, pe 22 august, James Gillies a emis un comunicat de presă la CERN. Nu se menționau deloc datele ATLAS și CMS combinate care fuseseră promise la Grenoble. Când datele au fost completate cu încă un femtobarn^{-1} sau chiar mai mult din datele culese în intervalul dintre conferințe, evenimentele în exces observate în regiunea de masă joasă din jurul lui 135 GeV *scăzuseră* în semnificație. „Acum, cu datele suplimentare analizate, nivelul de semnificație al acelor fluctuații a scăzut puțin“, anunța, destul de solemn, comunicatul de presă.[15]

Era greu să nu fii dezamăgit. Semnalele care apăruseră în rezultatele prezentate la Grenoble deveniseră mai puțin semnificative în rezultatele prezentate la Mumbai. Performanța excepțională a LHC de a furniza un volum de date de peste 2 femtobarni^{-1}

* Din păcate, Robert Brout murise în mai 2011 după o lungă suferință. Premiul Nobel nu se acordă postum, iar fiecare premiu se poate împărți la maximum trei persoane. (*N. a.*)

fiecărui detector până în august făcuse să se nască speranța că răspunsul la „întrebarea lui Shakespeare“ ar putea sosi mai degrabă mai curând decât mai târziu. Fără îndoială însă, Dumnezeu hotărâse să fie malițios – lucrurile n-aveau să meargă aşa uşor.

Deşi date din peste 140 de bilioane de ciocniri proton–proton fuseseră deja acumulate de fiecare detector, fizicienii încă se luptau doar cu o mână de evenimente în exces. Iar statistica numerelor mici poate fi supusă unor fluctuații necontrolabile. Schimbări mici pot produce diferențe mari.

De exemplu, statistica datului cu banul pare foarte simplă. Ştim că există o şansă de 50:50 de a obține „cap sau pajură“. Dar, dacă ne uităm doar la câteva încercări, nu trebuie să ne mirăm dacă vedem un şir care indică un exces al unei anumite fețe a banului. Nu înseamnă că moneda e falsă. Pur şi simplu nu am efectuat suficient de multe aruncări care să ne dea un eşantion reprezentativ. Pe măsură ce strângem mai multe date, ne aşteptăm ca orice exces să dispară treptat.

Rezultatele prezentate la Mumbai nu însemnau totuşi că bosonul Higgs al Modelului Standard nu există. Erau încă evenimente în exces la energii între 115 şi 145 GeV, dar acesta era un interval de energie despre care se ştia deja că e destul de problematic pentru LHC.

Rămânea un singur lucru de făcut. Trebuia să avem mai multă răbdare şi să aşteptăm să fie analizate mai multe date. Higgs aşteptase 47 de ani. Câteva luni în plus nu mai contau.

*

LHC a continuat să funcționeze peste aşteptări toată vara lui 2011 şi la începutul toamnei, atingând o luminozitate de vârf de 3 650 microbarni^{-1} pe secundă. Perioada de operare cu protoni s-a încheiat pe 21 octombrie, fiecare colaborare strângând cu detectorul respectiv un volum de date de peste 5 femtobarni^{-1}, dintr-un număr de 350 de bilioane de ciocniri proton–proton.

Dar o oarecare îngrijorare plutea în aer. Cele întâmplate la Mumbai subminaseră încrederea. Nici un anunț despre Higgs nu mai venise de la CERN după conferința de la Mumbai, şi nici un anunț nu părea să se întrevadă. Îndelung promisele date combinate de la detectorii ATLAS şi CMS au fost în sfârşit comunicate, dar ele nu ne spuneau nimic nou şi se refereau doar la volumul de date de 2 femtobarni^{-1} care fuseseră disponibile în iulie. Setul de date combinate era acum de peste cinci ori mai mare.

Un val de agitație a fost produs în schimb de anunțul, făcut pe 23 septembrie 2013, că un grup de fizicieni care lucrau la experimentul OPERA*, aflat la adâncime sub muntele Gran Sasso din lanțul Apeninilor din centrul Italiei, era pe punctul de a raporta rezultatele unor măsurători extrem de minuțioase ale vitezei neutrinilor miuonici generați la CERN, la o distanță de 730 de kilometri. Rezultatele sugerau că neutrinii se deplasau prin Pământ şi ajungeau la destinație cu o viteză puțin *mai mare* decât viteza luminii.

În timp ce dezbaterile privind neutrinii mai rapizi decât lumina luau amploare, alți fizicieni de la CERN încercau să explice că nedescoperirea bosonului Higgs reprezenta totuşi un important pas înainte pentru fizica energiilor înalte. Era, desigur, adevărat că nedescoperirea va submina Modelul Standard şi îi va obliga pe teoreticieni să-şi ia de la capăt calculele complicate. Dar, cu toată bunăvoința din lume, a nu găsi nimic nu e pur şi simplu acelaşi lucru cu a găsi *ceva*.

Perspectivele fiind destul de sumbre, anunțul că va avea loc o reuniune a Consiliului CERN cu reprezentanții țărilor membre pentru a discuta ultimele rezultate în căutarea bosonului Higgs nu părea să impresioneze prea mult. Prima zi a reuniunii, programată pentru 12 decembrie 2011, urma să se desfăşoare cu uşile

---

* OPERA este un acronim de la Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus (proiect de studiere a oscilațiilor cu un aparat care măsoară urmele particulelor în emulsii) şi este o colaborare dintre CERN şi Laboratoarele Naționale din Gran Sasso (LNGS). (*N. a.*)

închise. Dar prezentările publice ale lui Gianotti şi Tonelli, planificate pentru a doua zi, păreau ceva mai promiţătoare. Exista oare ceva interesant de spus?

Reprezentanţii presei din toată lumea s-au strâns la CERN în ziua de marţi, 13 decembrie. Ziariştii erau fără îndoială cam năuciţi de prezentările tehnice destul de seci la care asistaseră, dar concluziile erau totuşi cât se poate de convingătoare.

Combinând datele din câteva canale posibile de dezintegrare a bosonului Higgs, colaborarea ATLAS observase un exces de evenimente corespunzând valorii 3,6 sigma peste fondul prezis pentru un boson Higgs cu masa de 126 GeV. CMS a raportat un exces de evenimente combinate cu un nivel de semnificaţie statistică puţin mai scăzut, de 2,4 sigma, pentru un boson Higgs cu masa de aproximativ 124 GeV.

Fizicienii îndemnau totuşi la prudenţă. „Acest exces se poate datora unei fluctuaţii", a spus Gianotti. „Dar ar putea fi şi ceva mai interesant. Nu putem trage nici o concluzie în această etapă. Avem nevoie de mai multe studii şi de mai multe date. Având în vedere performanţa excepţională a LHC din acest an, nu va trebui să aşteptăm mult pentru a obţine date suficiente, şi sperăm ca vom lămuri misterul în 2012."[16]

Heuer a explicat: „[Datele conţin] semnale interesante în câteva canale în două experimente, dar vă rog să fiţi prudenţi. Nu l-am găsit încă. Nu l-am exclus încă. Rămâneţi pe recepţie în anul care vine."[17] Jon Butterworth a declarat pentru buletinul de ştiri al postului britanic Channel 4: „Suntem cu toţii emoţionaţi, pentru că semnalul pare să fie foarte sugestiv şi, aşa cum a spus Rolf Heuer, a apărut în mai multe locuri simultan. Dar mai trebuie încă să dăm cu zarul de câteva ori."[18]

Higgs însuşi a declarat: „Ei bine, n-o să mă duc acasă să deschid o sticlă de whisky ca să-mi înec amarul, dar nici n-am să mă duc acasă ca să destup o sticlă de şampanie!"[19]

Într-o postare pe blog din aceeaşi zi, Dorigo a declarat că rezultatele erau „o dovadă fermă" pentru un boson Higgs al

Modelului Standard, cu o masă de aproximativ 125 GeV.[20] A urmat un scurt, dar intens război verbal în blogosferă, când teoreticianul american Matt Strassler a adoptat o atitudine mai conservatoare, susținând că folosirea de către Dorigo a termenului „fermă“ nu era justificată: „Dacă spunea «o dovadă preliminară», n-aş fi zis nimic. Dar aşa, mi se pare că a depăşit limita…“[21]

Realitatea e că fizicienii cereau în cor prudență, însă mulți erau gata să-şi asume individual riscul, după cum mi-a explicat Butterworth: „Avem într-adevăr nevoie de date pentru a fi siguri, dar eu unul aş paria pe rezultat. Depinde cât de mult îți place să pariezi.“[22]

Fără nici o exagerare, existau motive serioase de optimism. Cu LHC programat să înceapă din nou sesiunea de fizica protonilor în aprilie 2012, atenția s-a îndreptat din nou spre marile conferințe din timpul verii.

*

Parametrii următoarei runde la LHC au fost hotărâți la o reuniune ținută în februarie 2012 la Chamonix. După un an de funcționare cu mare succes, inginerii erau acum mult mai încrezători în privința posibilităților instalației şi erau de acord să împingă energia de ciocnire totală proton–proton până la 8 TeV. Această energie mai mare era de aşteptat să ofere o creştere de până la 30% a ratei de producere a bosonului Higgs, care, luând în considerare efectele fondului (şi el crescut), ducea la o creştere a sensibilității de 10-15%. Obiectivul stabilit pentru 2012 era să se colecteze 15 femtobarni^{-1} de date la această energie mai înaltă, ceea ce însemna că vor exista cu siguranță suficiente date pentru a pune capăt căutării bosonului Higgs.

Pe 22 februarie 2012 s-a anunțat că rezultatele de la OPERA care implicau neutrini mai rapizi decât lumina erau greşite. Un cablu de fibră optică slăbit produsese o mică întârziere în măsurătorile de timp, ceea ce condusese la o scădere a timpului de zbor al neutrinilor cu aproximativ 73 de miliardimi de secundă.

Când au fost corectate, măsurătorile au fost perfect compatibile cu deplasarea neutrinilor cu viteza luminii.

Era o concluzie oarecum jenantă a întregii poveştii, dar fizicienii de pretutindeni au răsuflat uşuraţi, ştiind sigur că teoria restrânsă a relativităţii a lui Einstein nu era în pericol. Câţiva membri marcanţi ai colaborării OPERA s-au retras din funcţii. Acesta a fost (dacă mai era nevoie) un avertisment serios în legătură cu ce se poate întâmpla atunci când, după un experiment complicat de fizică, se fac anunţuri publice care se dovedesc ulterior false.

LHC a fost pus din nou în funcţiune pe 12 martie, iar energia de ciocnire de 8 TeV a fost atinsă după optsprezece zile. Runda de fizica protonilor a început efectiv la mijlocul lui aprilie. Luminozitatea instantanee a atins un maximum de 6 760 de microbarni^{-1} pe secundă. Deşi colectarea datelor a fost încetinită puţin de unele probleme tehnice legate de criogenie, până la sfârşitul lui mai LHC a furnizat fiecărei colaborări cantitatea impresionantă de date de 1 femtobarn^{-1} *pe săptămână*.

Se spera tot mai mult că se va anunţa ceva la cea de-a XXXVI-a Conferinţă Internaţională de Fizica Energiilor Înalte (International Conference on High Energy Physics – ICHEP), care urma să înceapă pe 4 iulie la Melbourne, în Australia. Până pe 10 iunie, data-limită după care teoretic nu mai era posibil să se analizeze alte măsurători în timp util pentru a fi prezentate la conferinţă, LHC furnizase fiecărei colaborări un volum de date de aproximativ 5 femtobarni^{-1} , tot atât cât se adunase în întregul an 2011.

Inevitabil, zvonurile au început să apară pe blogurile de fizica energiilor înalte. Peter Woit a postat o informaţie sugerând că semnale convingătoare privind bosonul Higgs se vedeau din nou, datele din 2011 şi circa o jumătate din datele colectate în 2012 indicând un exces de evenimente cu un nivel de semnificaţie de 4 sigma în canalul $H \rightarrow \gamma\gamma$. Intensitatea speculaţiilor a crescut. Toate semnele indicau că atât ATLAS, cât şi CMS ar putea comunica date care să arate un exces doar cu puţin mai

mic decât cei 5 sigma necesari pentru a anunța o descoperire. Dacă era într-adevăr aşa, atunci n-ar mai fi încăput nici o îndoială că prin combinarea rezultatelor celor două colaborări s-ar ajunge la o concluzie în favoarea existenței a ceva de genul bosonului Higgs.

Dar vor face colaborările acest pas? Dacă nu, problema va rămâne oficial netranşată până când se vor obține şi mai multe date. Aceasta va da libertate bloggerilor să-şi publice propriile combinații de date, cu siguranță foarte rezonabile, dar în mod evident neoficiale. Bloggerii se puteau trezi în situația de a anunța o „descoperire“ care nu putea fi confirmată oficial. Nu exista nici un precedent pentru această situație în întreaga istorie a ştiinței.

Şi atunci, cu o mişcare surprinzătoare, CERN a anunțat că va ține un seminar la sediul său din Geneva pe 4 iulie, într-o „avanpremieră“ la conferința ICHEP. Seminarul urma să ofere informații recente privind căutarea bosonului Higgs de către ATLAS şi CMS, fiind urmat de o conferință de presă. Higgs, Englert, Guralnik, Hagen şi Kibble au fost toți invitați să participe.*

Acesta era fără îndoială un semn că una din colaborări (sau ambele) atinsese (atinseseră) nivelul de semnificație de 5 sigma cerut pentru anunțul unei descoperiri. Intensitatea speculațiilor a crescut din nou. Ca să nu rămână mai prejos, fizicienii de la Fermilab ne-au amintit că fiecare din cele două colaborări de la Tevatron, D0 şi CDF, acumulase aproape 10 femtobarni^{-1} de date la o energie de ciocnire mai joasă. La o conferință ținută în martie la Moriond, în Franța, fizicienii de la Fermilab prezentaseră rezultate care indicau un exces de 2,2 sigma în intervalul 115–135 GeV, cu accent pe dezintegrările în doi cuarci bottom, canal care nu e observat cu uşurință la LHC din cauza fondului ridicat. Într-un seminar ulterior de pe 2 iulie, cu două zile înainte de anunțul de la CERN, fizicienii de la Fermilab au declarat că,

---

* Kibble avea un alt program pentru acea zi. Higgs, Englert, Guralnik şi Hagen au participat cu toții la seminar. (*N. a.*)

prin îmbunătățiri ale analizei, împinseseră nivelul de semnificație la 2,9 sigma. Bineînțeles că rezultatul era insuficient pentru a anunța o descoperire, dar avea să ofere o confirmare puternică oricărui anunț ulterior al unei descoperiri.

*

Pe 4 iulie am urmărit transmisiunea directă de la CERN prin Internet, stând confortabil în biroul meu, şi am urmărit reacțiile publicului prezent prin postările în direct pe blog ale lui Dorigo, care era prezent la seminar.

Heuer a declarat că această zi e deosebită din mai multe motive. Era, la urma urmei, evenimentul de deschidere a unei conferințe internaționale de fizică, prima conferință de acest fel deschisă prin legătură video de pe un alt continent.

A urmat Joe Incandela, profesor de fizică la Universitatea din Santa Barbara, California, care a vorbit ca purtător de cuvânt al colaborării CMS. Părea tulburat, ca şi cum ar fi fost conştient de importanța istorică a scenei pe care stătea acum în picioare, în centru. Tulburarea lui s-a domolit când şi-a intrat în ritm.

Prezentarea sa punea în mod justificat accent pe complexitatea năucitoare a acestor experimente. Dacă te limitai să rezumi totul într-un singur rezultat – răspunsul la întrebarea lui Shakespeare –, însemna să nu respecți eforturile tuturor celor implicați în funcționarea LHC – operarea detectorilor, crearea sistemului de achiziție a datelor, controlul evenimentelor care au loc simultan, calculul fondului, organizarea rețelei de computere răspândite în lume şi efectuarea analizei detaliate –, care munciseră renunțând adesea la somn. Incandela a vorbit destul de mult despre aceste aspecte tehnice, ca şi cum ar fi vrut să-i asigure pe toți că nu încăpea nici o îndoială în privința rezultatelor pe care urma să le prezinte.

Când, în fine, a ajuns la ele, concluzia îți dădea fiori. Combinând datele de ciocnire de la 7 TeV din 2011 cu datele de la 8 TeV din 2012, se obținuse un exces de evenimente aproape de 125 GeV în canalul $H\rightarrow\gamma\gamma$ cu un nivel de semnificație de 4,1

sigma. O combinație similară a datelor din canalul $H \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ produsese un exces de evenimente cu un nivel de semnificație de 3,2 sigma. Punând la un loc datele din cele două canale, s-a obținut un exces de 5,0 sigma. Excesul aşteptat pentru un boson Higgs al Modelului Standard de această masă este de 4,7 sigma. „E grozav că avem 5 sigma“, a spus Incandela.[23]

În sală au izbucnit aplauze spontane.

Au mai fost prezentate alte câteva rezultate, legate de alte canale de dezintegrare, dar ele n-au contribuit prea mult la imaginea generală. Rezultatele combinate sunt arătate în figura 27(a), care reprezintă „valoarea lui p“ – o măsură a semnificației statistice a rezultatelor – în funcție de masa bosonului Higgs.

Intrându-se deja în criză de timp, seminarul a trecut brusc la cea de-a doua colaborare. Fabiola Gianotti s-a ridicat să prezinte rezultatele ATLAS. Ea s-a referit cam la aceleaşi probleme, subliniind aspectele tehnice importante ale experimentului. M-a frapat un lucru: cu date însumând 10,7 femtobarni^{-1}, numărul de evenimente în exces la 126 GeV care puteau fi aşteptate din canalul $H \rightarrow \gamma\gamma$ era estimat a fi de doar 170. Numărul evenimentelor de fond era aşteptat a fi de 6 340, un raport semnal/fond de doar 3%.

Concluzia finală a Fabiolei Gianotti a fost aproape identică cu cea a colegului ei de la CMS. Combinând datele din 2011 şi 2012 se obținuse un exces de evenimente la 126,5 GeV în canalul $H \rightarrow \gamma\gamma$ de 4,5 sigma, un nivel de semnificație puțin mai mare decât predicția Modelului Standard. Datele corespunzătoare din canalul $H \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ au produs un exces la 125 GeV cu un nivel de semnificație de 3,4 sigma. Combinând datele din cele două canale, s-a obținut un exces de 5,0 sigma, de comparat cu predicția de 4,6 sigma a Modelului Standard. Rezultatele sunt rezumate în figura 27(b).

Ambele colaborări găsiseră o dovadă la nivelul de 5 sigma, suficientă pentru a anunța o descoperire. Au urmat alte aplauze.

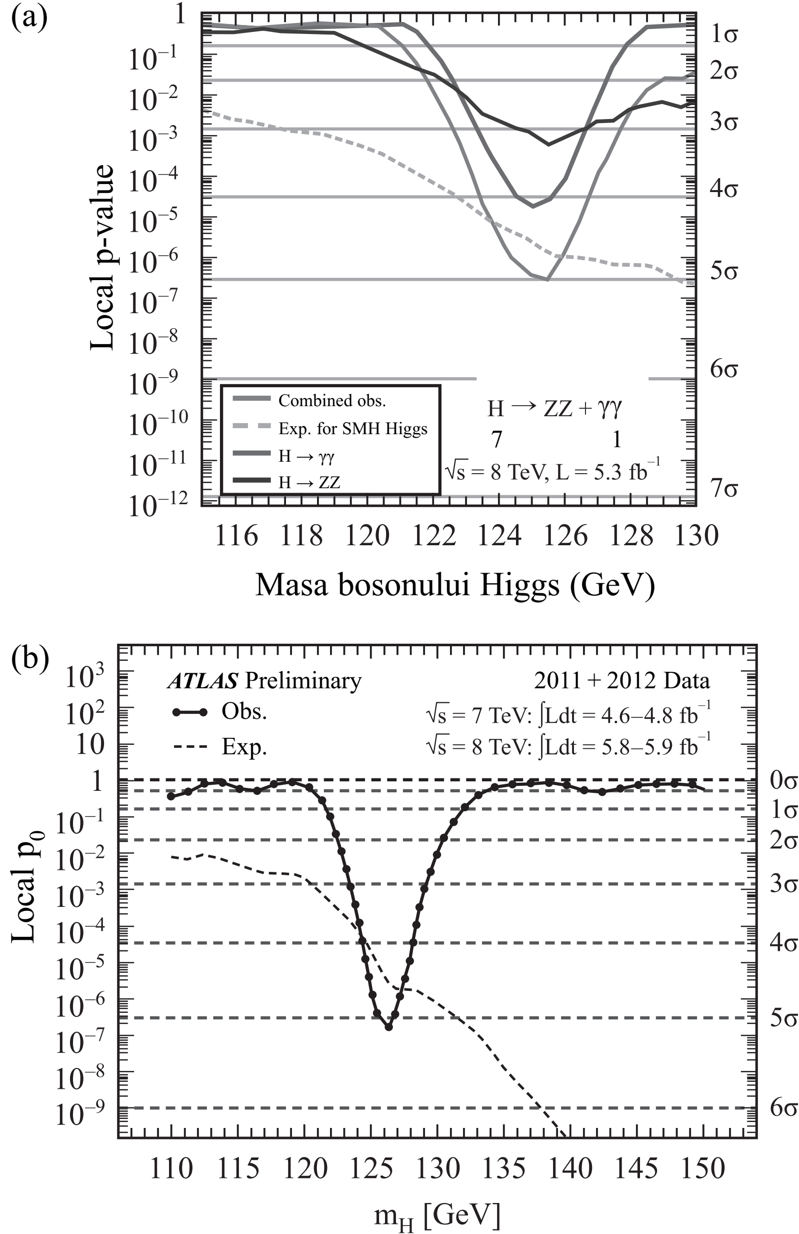


Figura 27. Rezultatele preliminare raportate de colaborările CMS şi ATLAS pe 4 iulie 2012. Graficele prezintă variaţia „valorii lui p“ – o măsură a nivelului de semnificaţie statistică – în funcţie de masa particulei Higgs. (a) Rezultatele CMS indică un exces pentru canalele $H\to\gamma\gamma$ şi $H\to Z^0Z^0\to\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$, iar combinaţia lor atinge nivelul crucial de 5 sigma. Linia întreruptă indică excesul prezis pentru un boson Higgs al Modelului Standard. (b) Figura similară de la ATLAS indică acelaşi rezultat.

Heuer a declarat: „Ca nespecialist, aş spune că eu cred că l-am găsit. Sunteţi de acord?“[24] Nu mai încăpea nici o îndoială că ceva care semăna foarte mult cu bosonul Higgs al Modelului Standard fusese descoperit şi că, pentru un nespecialist, era chiar „el“. Dar fizicienii au standarde mai exigente. Ei erau acum foarte precauţi în legătură cu interpretarea descoperirii pe care tocmai o anunţaseră şi, sub presiunea întrebărilor ziariştilor într-o conferinţă de presă ulterioară, au adoptat concluzia că această nouă particulă este *compatibilă* cu bosonul Higgs. Ei au refuzat să răspundă la întrebarea dacă acesta era sau nu cu adevărat *bosonul Higgs*.

Simplificând lucrurile, noul boson are o masă cuprinsă între 125 şi 126 GeV şi interacţionează cu alte particule ale Modelului Standard exact în modul aşteptat pentru bosonul Higgs. În afara unui mic exces* observat în canalul de dezintegrare $H \rightarrow \gamma\gamma$, modurile de dezintegrare ale noului boson în alte particule au rapoartele aşteptate pentru un boson Higgs al Modelului Standard. Experimentele ATLAS şi CMS spun sigur că acesta e un boson, dar nimic nu e clar în ce priveşte valoarea numărului său cuantic de spin, care ar putea fi 0 sau 2. Totuşi, singura particulă care se anticipează că ar avea spinul 2 este gravitonul, presupusul purtător al forţei gravitaţionale. Spinul 0 este deci mult mai probabil. Parafrazându-l pe Rubbia, am fi tentaţi să declarăm, cu oarecare îndreptăţire: „Arată ca bosonul Higgs al Modelului Standard, miroase ca bosonul Higgs al Modelului Standard, trebuie să fie bosonul Higgs al Modelului Standard.“

Adevărul e că aceste rezultate reprezintă o piatră de hotar crucială pentru altă călătorie lungă. A fost descoperit un nou boson, care le apare tuturor ca un boson Higgs. Dar *care* boson Higgs? Modelul Standard are nevoie doar de unul pentru a rupe simetria electroslabă. Modelul Supersimetric Minimal are

---

* Acest exces aparent a dispărut după analiza unui volum mai mare de date. (*N. t.*)

nevoie de cinci. Alte modele teoretice fac alte predicții. Singura cale de a afla cu precizie ce tip de particulă s-a descoperit este să se exploreze proprietățile şi comportamentul ei în alte experimente.

Comunicatul de presă CERN afirma:[25]

> Identificarea precisă a caracteristicilor noii particule va necesita un timp îndelungat şi numeroase date. Dar, orice formă va lua particula Higgs, cunoaşterea noastră privind structura fundamentală a materiei e pe punctul să facă un mare pas înainte.

Seminarul s-a încheiat cu câteva binemeritate manifestări exuberante de prietenie şi felicitări reciproce. Când a fost întrebat ce părere are, Peter Higgs a felicitat laboratorul pentru remarcabilul lui succes şi a spus: „Este într-adevăr un lucru incredibil că s-a întâmplat în timpul vieții mele.“[26]

Un capitol important din eforturile noastre de a înțelege natura fundamentală a substanței materiale se apropie de sfârşit. Un nou capitol captivant e gata să înceapă.

EPILOG

Construcția masei

Din ce e alcătuită lumea?

La mijlocul anilor ’30 am fi spus că toată substanța materială din lume e formată din elemente chimice şi că fiecare element constă din atomi. Fiecare atom constă la rândul lui dintr-un nucleu compus dintr-un număr variabil de protoni încărcați pozitiv şi neutroni neutri electric. În jurul nucleului se rotesc electronii încărcați electric negativ, legați prin forța de atracție electrică. Fiecare electron poate avea o orientare a spinului în sus sau în jos, şi fiecare orbital atomic poate adăposti doi electroni, cu condiția ca spinii lor să fie împerecheați. Electronii pot sări dintr-un orbital în altul prin absorbție sau emisie de radiație electromagnetică sub formă de fotoni.

Am fi explicat că masa unui cub de gheață de 18 grame ținut în palmă se obține din masa tuturor celor 10 800 miliarde de bilioane de protoni şi neutroni.

Astăzi răspunsul nostru a devenit mult mai subtil.

Protonii şi neutronii din nucleu nu sunt, de fapt, particule elementare. Ei sunt compuşi din cuarci cu sarcini electrice fracționare. Un proton constă din trei cuarci de diferite tipuri sau „arome“ – doi cuarci up şi unul down. Cuarcii se disting şi prin „culoarea“ lor: roşu, verde şi albastru. Cei doi cuarci up şi cuarcul down dintr-un proton au culori diferite, combinația finală fiind „albă“. Un neutron constă dintr-un cuarc up şi doi cuarci down, fiecare cuarc având din nou o culoare diferită.

Forța de culoare dintre cuarci este transmisă de opt tipuri diferite de particule de forță, numite gluoni. Această forță crește în intensitate nu atunci când cuarcii se află aproape unul de altul, după cum ne-am aștepta, ci atunci când se îndepărtează. Forța nucleară tare dintre protoni și neutroni este doar un vestigiu, un rezultat al forței de culoare dintre cuarcii constituenți.

Descoperirea unei noi particule la CERN indică faptul că masele cuarcilor apar din interacțiile cu câmpul Higgs. Aceste interacții transformă cuarcii, care altminteri ar avea masă nulă, în particule cu masă. Interacțiile le dau particulelor o *grosime*, care le face să se miște mai încet. Această rezistență la accelerare este ceea ce numim masă.

Dar masele cuarcilor sunt foarte mici, contribuind doar cu 1% la masa protonului sau a neutronului. Restul de 99% se obține din energia purtată de gluonii fără masă, care se deplasează de la un cuarc la altul și îi leagă între ei.

În Modelul Standard, noțiunea de masă, ca proprietate intrinsecă sau măsură a cantității de substanță, a dispărut. Masa este în schimb construită în întregime din *energia* interacțiilor care au loc între câmpurile cuantice elementare și particulele lor.

Bosonul Higgs este o parte a mecanismului care explică felul în care e construită masa tuturor particulelor din univers. Toată materia din lume o fi alcătuită din cuarci și leptoni, dar ea își datorează substanța energiei dobândite prin interacțiile cu câmpul Higgs și schimbului de gluoni.

Fără aceste interacții, materia ar fi la fel de efemeră și lipsită de substanță ca însăși lumina și nimic n-ar exista.

Postfață

Runda de fizică proton–proton la 8 TeV a durat până la mijlocul lui decembrie 2012. LHC livrase peste 23 $femtobarni^{-1}$ de date de ciocnire la 8 TeV pentru fiecare dintre detectorii ATLAS şi CMS, care se adăugau celor 5,6 $femtobarni^{-1}$ la 7 TeV furnizați în 2011. Acceleratorul a fost oprit în februarie 2013 pentru o lungă perioadă de renovare. Aceasta are ca scop modificarea instalației pentru a o face să funcționeze la energii de ciocnire proton–proton de până la 13 TeV. Un inginer a pus un anunț pe avizierul de la LHC: „Fără fascicul o perioadă. Timpul de acces necesar estimat la circa 2 ani."

Pe măsură ce fizicienii îşi rafinau analizele, apăreau întrebări şi se făceau speculații. Va indica excesul observat în dezintegrarea în doi fotoni o fizică nouă, dincolo de Modelul Standard? Vor sugera rezultatele că există mai mulți bosoni Higgs? Sau, dimpotrivă, ele se vor consolida în jurul unui singur boson Higgs „convențional", al Modelului Standard?

Rezultatele au fost raportate în timpul conferinței anuale „Rencontres de Moriond" desfăşurate la începutul lui martie în La Thuille, o stațiune de schi din Valle d'Aosta, în Alpii italieni. Ele au fost cât se poate de tranşante şi n-au oferit nici o consolare partizanilor teoriilor care încercau să treacă dincolo de Modelul Standard. Când se adăugaseră mai multe date, excesul aparent din rata dezintegrării $H\rightarrow\gamma\gamma$ observat de ATLAS nu crescuse, ci scăzuse. Rezultatele CMS pentru acest canal,

raportate o săptămână mai târziu, erau şi ele perfect compatibile cu predicția Modelului Standard. Alte canale de dezintegrare, inclusiv dezintegrările în doi fermioni (în acest caz leptonii tau), erau, de asemenea, conforme cu predicțiile Modelului Standard. Ambele colaborări au postat pe Internet imagini cu o animație, permițându-le celor interesați să urmărească felul în care au apărut semnalele grăitoare privind noua particulă, pe măsură ce datele se acumulau.

Nu au fost surprize nici în ce priveşte spinul noii particule, toate semnele indicând spinul 0. Într-un comunicat de presă CERN din 14 martie 2013, purtătorul de cuvânt al CMS, Joe Incandela, a spus: „Rezultatele preliminare cu setul de date complet din 2012 sunt splendide, iar pentru mine e limpede că avem de-a face cu un boson Higgs, deşi mai avem încă un drum lung de parcurs până vom şti ce tip de boson Higgs este."

Fizicienii erau acum gata să facă un pas înainte față de anunțul din 12 iulie 2012, care vorbea despre descoperirea unei particule *compatibile* cu bosonul Higgs. Acum nu mai încăpea aproape nici o îndoială că acesta era într-adevăr *un* boson Higgs. Întrebarea dacă el este sau nu *bosonul* Higgs rămâne fără răspuns, cel puțin deocamdată.

Jim Baggott
Reading, 13 martie 2013

Postfață la ediția în limba română

Descoperirea bosonului Higgs, povestită în această carte, a dominat fizica particulelor în cei trei ani care s-au scurs de la anunțul făcut de CERN în iulie 2012.

Peter Higgs şi François Englert au primit Premiul Nobel pentru Fizică pe anul 2013. În motivația Academiei Suedeze se spune că premiul recompensează „descoperirea teoretică a unui mecanism care contribuie la înțelegerea originii masei particulelor subatomice şi care a fost confirmat recent prin descoperirea particulei fundamentale prezise în experimentele ATLAS şi CMS la acceleratorul LHC de la CERN".

Colaborările ATLAS şi CMS şi-au publicat primele rezultate anunțând descoperirea noii particule în acelaşi număr din revista *Physics Letters*, vol. 716 (2012), pp. 1–29 şi respectiv 30–61. Aceste articole au deja mii de citări în literatură. Analizele ulterioare, folosind toate datele acumulate în ciocniri la 7 şi 8 TeV, au inclus şi alte canale de dezintegrare ale bosonului Higgs. Din datele combinate ale dezintegrărilor în perechi $\gamma\gamma$, ZZ, WW, tau–antitau, bottom–antibottom şi miuon–antimiuon s-au stabilit cu o precizie din ce în ce mai mare masa, spinul şi parametrii de cuplaj ai noii particule. La reuniunea de fizică „Rencontres de Moriond" care a avut loc în La Thuile, Italia, în martie 2015, colaborările ATLAS şi CMS au comunicat din datele lor combinate valoarea de 125,09±0,24 GeV pentru masa bosonului Higgs, cu o precizie impresionantă (eroarea e de sub 0,2%).

Toate rezultatele confirmă Modelul Standard al particulelor, care acum ar putea fi numit pe drept cuvânt „Teoria Standard“ a particulelor, aşa cum a propus recent cunoscutul fizician, laureat al Premiului Nobel, Gerard ’t Hooft.*

Conform planificării inițiale, acceleratorul LHC a fost închis timp de aproape doi ani, de la începutul lui 2013 până la începutul lui 2015, pentru modificări care să permită mărirea energiei de ciocnire. În acest timp, colaborările ATLAS şi CMS au lucrat intens pentru a creşte performanțele detectorilor lor, în special în ce priveşte achiziția şi prelucrarea datelor. Acceleratorul şi-a reluat funcționarea în martie 2015 şi va atinge energii de ciocnire proton–proton de 13 TeV în cursul anului 2015. A doua rundă de experimente va dura până în 2017, şi, după o altă perioadă de revizie în 2018, în care se va mări energia până la 14 TeV, experimentele vor vontinua să strângă date până în 2021. Începând cu 2022, acceleratorul şi detectorii vor intra într-o etapă de modificări majore, pentru a doua fază de operare, de luminozitate foarte înaltă. Noile condiții vor mări şansele descoperirii unor particule şi fenomene noi.

Fizicienii speră să răspundă la întrebarea dacă există un singur boson Higgs sau mai mulți, aşa cum prezic anumite teorii mai generale. Ei speră să poată hotărî dacă particulele supersimetrice, care au refuzat până acum să se arate, există sau nu cu adevărat, şi să afle ce este materia întunecată din univers. Minunata aventură de care vorbea Steven Weinberg în cuvântul său înainte, efortul neobosit al omenirii de a înțelege universul în care trăim, va continua şi de acum înainte.

Irinel Caprini
iulie 2015

---

* Vezi Gerard ‘t Hooft, *The Evolution of Quantum Field Theory, From QED to Grand Unification*, http://arxiv.org/abs/1503.05007, contribuție la volumul *The Standard Theory up to the Higgs discovery – 60 years of CERN*, L. Maiani şi G. Rolandi, editori. (*N. t.*)

NOTE

Prolog: Formă şi substanţă

1. Albert Eisntein, *Annalen der Physik*, 18 (1905), p. 639. Traducerea engleză citată în John Stachel (editor), *Eistein's Miraculous Year: Five Papers that Chage the Face of Physics*, Princeton University Press, 2005, p. 161.

Capitolul 1: Poezia ideilor logice

1. Auguste Dick, *Emy Noether 1882–1935*, Birkhäuser, Boston, 1981, p. 32. Traducere în engleză de H.J. Blocher.
2. Albert Einstein, scrisoare către Hermann Weyl, 8 aprilie 1918, citat în Pais, *Subtle is the Lord*, p. 341.
3. Louis de Broglie, „Recherches sur la Théorie des Quanta“, teză de doctorat, Facultatea de Ştiinţe, Universitatea din Paris, 1924, p. 10. Traducere în engleză de A.F. Kracklauer.
4. Albert Einstein, *New York Times,* 5 mai 1935.

Capitolul 2: Asta nu-i o scuză!

1. Julian Schwinger, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 4 martie 1983. Citat în Crease şi Mann, p. 127.
2. Richard Feynman, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 22 martie 1985. Citat în Crease şi Mann, p. 139.
3. Freeman Dyson, scrisoare către părinţii săi, 18 septembrie 1948. Citată în Schweber, p. 505.

4. Feynman, p. 7.
5. Chen Ning Yang, *Selected Papers with Commentary*, W.H. Freeman, New York, 1983. Citat de Christine Sutton în Fermelo (editor), *It must Be Beautiful*, p. 241.
6. Robert Mills, interviu telefonic cu Robert Crease şi Charles Mann, 7 aprilie 1983. Citat în Crease şi Mann, p. 193.
7. Parte a unei conversații prezentată de Yang la Simpozionul Internațional de Istorie a Fizicii Particulelor, Batavia, Illinois, 2 mai 1985. Citat în Riordan, p. 198.
8. Citat în Enz, p. 481.
9. Chen Ning Yang, *Selected Papers with Commentary*, W.H. Freeman, New York, 1983. Citat de Christine Sutton în Fermelo (editor), *It must Be Beautiful*, p. 243.
10. C.N. Yang şi R.L. Mills, Physiscal Review, 96, 1 (1954), p. 195.

Capitolul 3: Oamenii se dovedesc obtuzi în această privință

1. Emilio Segrè, *Enrico Fermi: Physicist*, University of Chicago Press, 1970, p. 72.
2. Isidor Rabi, citat în Helge Kragh, *Quantum Generations*, p. 204.
3. Willis Lamb, *Nobel Lectures, Physics 1942–1962*, Elsevier, Amsterdam,1970, p. 286.
4. Citat de Helge Kragh ca „folclor din fizică" în *Quantum Generations*, p. 321.
5. Murray Gell-Mann şi Edward Rosenbaum, *Scientific American*, iulie 1957, pp. 72–88. La ideea de „stranietate" au ajuns cam în acelaşi timp şi fizicienii japonezi Kazuhiko Nishijima şi Tadao Nakano (care au numit-o sarcină η). Deşi a fost reținut termenul stranietate, teoria e numită uneori teoria Gell-Mann–Nishijima.
6. Sheldon Glashow, teză de doctorat la Universitatea Harvard, 1958, p. 75. Citată în Glashow, *Nobel Lectures, Physics 1971–1980*, editat de Stig Lundqist, World Scientific, Singapore, 1992, p. 496.
7. Murray Gell-Mann, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 3 martie 1983. Citat în Crease şi Mann, p. 225.
8. Murray Gell-Mann, Raport Caltech CALT-68-1214, pp. 22–23. Citat în Crease şi Mann, pp. 264–265.

Capitolul 4: Idei corecte aplicate într-o problemă greşită

1. Nambu, p. 180.
2. Robert Serber, interviu telefonic cu Robert Crease şi Charles Mann, 4 iunie 1983. Citat în Crease şi Mann, p. 281.
3. Murray Gell-Mann, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 3 martie 1983. Citat în Crease şi Mann, p. 281.
4. Murray Gell-Mann, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 3 martie 1983. Citat în Crease şi Mann, p. 282.
5. George Zweig, „An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking“, preprint CERN 8_{419}/TH.$_{412}$, 21 februarie 1964, p. 42.
6. P.W. Anderson, Physical Review, 130 (1963), p. 441, reprodus în E. Fahri şi R. Jackiw (editori), *Dynamical Gauge Symmetry Breaking: A Collection of Reprints*, World Scientific, Singapore, 1982, p. 50.
7. Peter Higgs, în Hoddeson *et al.*, p. 508.
8. Peter Higgs, *Physical Review Letters*, 13, 509 (1964).
9. Sidney Coleman, citat de Higgs în „My Life as a Boson: the Story of the «Higgs»“, prezentat la conferinţa inaugurală a Centrului de Fizică Teoretică din Michigan, 21–25 mai 2001.
10. Peter Higgs, în Hoddeson *et al.*, p. 510.
11. Steven Weinberg, *Nobel Lectures, Physics 1971–1980*, editat de Stig Lundqist, World Scientific, Singapore, 1992, p. 548.
12. Steven Weinberg, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 7 mai 1985. Citat în Crease şi Mann, p. 245.

Capitolul 5: Pot face asta!

1. Steven Weinberg, citat de John Iliopoulos într-un interviu cu Michael Riordan, 4 iunie 1985. Citat în Riordan, p. 211.
2. Sheldon Glashow, *Nobel Lectures, Physics 1971–1980*, editat de Stig Lundqist, World Scientific, Singapore, 1992, p. 500.
3. Gerard ’t Hooft, *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press, 1997, p. 58.
4. Martinus Veltman, comunicare personală către Andrew Pickering, citat în Pickering, p. 178.
5. Gerard ’t Hooft, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 7 mai 1985. Citat în Crease şi Mann, pp. 325–326.

6. Martinus Veltman, în Hoddeson *et al.*, p. 173.
7. Sheldon Glashow, citat de David Politzer, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 21 februarie 1985. Citat în Crease şi Mann, p. 326.
8. Gerard ’t Hooft, în Hoddeson *et al.*, p. 192.
9. Murray Gell-Mann, în Hoddeson *et al.*, p. 629.
10. W.A. Bardeen, H. Fritzsch şi M. Gell-Mann, *Proceedings of the Topical Meeting on Conformal Invariance in Hadron Physics*, Frascati, mai 1972. Citat în Crease şi Mann, p. 328.
11. Murray Gell-Mann, în Hoddeson *et al.*, p. 631.

Capitolul 6: Curenți neutri alternativi

1. Richard Feynman, interviu cu Michael Riordan, 14–15 martie 1984. Citat în Riordan, p. 152.
2. Richard Feynman, interviu cu Paul Tsai, 3 aprilie 1984. Citat în Riordan, p. 150.
3. Richard Feynman, citat de Jerome Friedman într-un interviu cu Michael Riordan, 24 octombrie 1985. Citat în Riordan, p. 151.
4. Donald Perkins, în Hoddeson *et al.*, p. 430.
5. Carlo Rubbia, scrisoare către André Lagarrigue, 17 iulie 1973. Citat în Crease şi Mann, p. 352.
6. Donald Perkins, *CERN Courier*, 1 iunie 2003.
7. David Cline, citat în Crease şi Mann, p. 357.

Capitolul 7: Trebuie să fie particule W

1. W.A. Bardeen, H. Fritzsch şi M. Gell-Mann, *Proceedings of the Topical Meeting on Conformal Invariance in Hadron Physics*, Frascati, mai 1972. Citat în Crease şi Mann, p. 328.
2. Frank Wilczek, *MIT Physics Annual 2003*, p. 35.
3. Pierre Darriulat, în Cashmore *et al*., p. 57.
4. Simon van der Meer, citat de Brian Southworth şi Gordon Fraser, *CERN Courier*, noiembrie 1983.
5. Pierre Darriulat, în Cashmore *et al*., p. 57.
6. Caro Rubbia, citat de Brian Southworth şi Gordon Fraser, *CERN Courier*, noiembrie 1983.
7. Lederman, p. 356.

Capitolul 8: Pasează în profunzime

1. Howard Georgi şi Sheldon Glashow, *Physical Review Letters*, 32 (1974), p. 438.
2. Howard Georgi, interviu cu Robert Crease şi Charles Mann, 29 ianuarie 1985. Citat în Crease şi Mann, p. 400.
3. Guth, p. 174.
4. *New York Times*, 6 iunie 1983.
5. Întregul citat sună în felul următor: „Prefer să fiu cenuşă decât praf; prefer ca scânteia din mine să ardă într-o flacără strălucitoare decât să se înăbuşe în lemn putred; prefer să fiu un meteorit splendid, cu fiecare atom din mine strălucind minunat, decât o planetă adormită şi veşnică.“ Jack London, citat în Halpern, p. 151.
6. Atribuit lui (sau asociat cu) Ken Stabler. Citatul a fost folosit de ziaristul George Will în titlul unui articol din *Washington Post* despre sprijinul acordat de Ronald Reagan proiectului SSC.
7. Acest scurt discurs din filmul *Knute Rockne: All American* poate fi găsit pe site-ul American Rhetoric, la adresa: www.americanrhetoric.com/MovieSpeeches/moviespeechknuterockneallamerican.htlm.
8. Weinberg, p. 220.
9. Lederman, p. 406.
10. Raphael Kasper, citat în *Dallas Morning News*, 23 iulie 2005.
11. Herman Wouk, *A Hole in Texas*, Little Brown & Company, New York, 2004. Nota autorului.
12. Carlo Rubbia, citat în Lederman, p. 381.

Capitolul 9: Un moment fantastic

1. William Waldegrave, citat în Sample, p. 163.
2. Textul lui Davin Miller poate fi găsit la: http:/www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html. Citat cu permisiunea autorului.
3. David Miller, comunicare personală, 4 octombrie 2010.
4. Luciano Maiani, *CERN Courier*, 26 februarie 2001.
5. http:/cms.web.cern.ch/cms/Detector/FullDetector/index.htlm.
6. Lyndon Evans, citat în *CERN Bulletin* 37–38, 2008.

Capitolul 10: Întrebarea lui Shakespeare

1. *Fermilab Today*, mesaj twitter citat de Tom Chivers, *The Telegraph*, 13 iulie 2010.
2. Tommaso Dorigo, „Rumours About a Light Higgs“, *A Quantum Diaries Survivor*, postare pe blog din 8 iulie 2010, www.science20.com/quantum_diaries_survivor/.
3. Leon Lederman, citat de Tom Chivers, *The Telegraph*, 13 iulie 2010.
4. Rolf Heuer, citat în *CERN Bulletin*, 31 ianuarie 2011.
5. Albert Einstein, citat în Alice Calaprice (editor), *The Ultimate Quotable Einstein*, Princeton University Press, 2011, p. 409.
6. Jon Butterworth, interviu televizat cu Krishnan Guru-Murthy, Channel 4 News, 24 aprilie 2011.
7. Jon Butterworth, „Rumours of the Higgs at ATLAS“, *Life and Physics*, postare din 24 aprilie 2011 pe blogul *Guardian*, www.guardian.co.uk/science/life-and-physics.
8. David Shiga, „Elusive Higgs Slips from Sight Again“, *New Scientist*, 4 mai 2011.
9. Jon Butterworth, „Told You So… Higgs Fails to Materialise“, *Life and Physics*, postare din 11 mai 2011 pe blogul *Guardian*, www.guardian.co.uk/science/life-and-physics.
10. Laurette Ponce, interviu cu autorul, 21 mai 2011.
11. Rolf Heuer, *DG's Talk to Staff*, CERN, 4 iulie 2011.
12. Lyndon Evans, interviu cu autorul, 22 iunie 2011.
13. Rolf Heuer, *DG's Talk to Staff*, CERN, 4 iulie 2011.
14. Peter Higgs, interviu cu autorul, 18 august 2011.
15. Comunicat de presă CERN, 22 august 2011.
16. Fabiola Gianotti, citată în comunicatul de presă CERN din 13 decembrie 2011.
17. Rolf Heuer, observații finale la seminarul public CERN din 13 decembrie 2011.
18. Jon Butterworth, interviu televizat cu Jon Snow, Channel 4 News, 13 decembrie 2011.
19. Peter Higgs, citat de Alan Walker într-o discuție cu autorul, 13 decembrie 2011.
20. Tommaso Dorigo, „Firm Evidence of a Higgs Boson at Last!“, *A Quantum Diaries Survivor*, postare pe blog din 13 decembrie 2011, www.science20.com/quantum_diaries_survivor/.

21. Matt Strassler, „Higgs Update Today: Inconclusive, as Expected“, *Of Particular Significance*, comentariu pe blog la 13 decembrie 2011, profmattstrassler.com/2011/12/13.
22. Jon Butterworth, discuție cu autorul, 23 decembrie 2011.
23. Joe Incandela, „Latest update in the search for the Higgs boson“, seminar CERN, 4 iulie 2012.
24. Rolf Heuer, „Latest update in the search for the Higgs boson“, seminar CERN, 4 iulie 2012.
25. Comunicat de presă CERN, 4 iulie 2012.
26. Peter Higgs, „Latest update in the search for the Higgs boson“, seminar CERN, 4 iulie 2012.

GLOSAR

Antiparticulă. Identică în ce priveşte masa cu o particulă „obişnuită“, dar de sarcină opusă. De exemplu, antiparticula electronului (e^-) este pozitronul (e^+). Antiparticula unui cuarc roşu este un anticuarc antiroşu. Fiecare particulă din Modelul Standard are o antiparticulă. Unele particule cu sarcină zero sunt propriile lor antiparticule (de exemplu, mezonul π^0), altele (de exemplu, mezonul K^0) nu coincid cu antiparticulele lor.

Aromă (sau **tip)**. Proprietate care distinge cuarcii între ei, pe lângă sarcina de culoare. Există şase arome sau tipuri de cuarci grupați în trei generații: up, charm şi top cu sarcina electrică +2/3, spinul ½ şi masele de 1,7–3,3 MeV, 1,27 GeV şi, respectiv, 172 GeV, şi down, strange şi bottom cu sarcina electrică –1/3, spinul ½ şi masele 4,1–5,8 MeV, 101 MeV şi, respectiv, 4,19 GeV. Termenul de aromă se aplică şi leptonilor: electronul, miuonul şi tauonul, precum şi neutrinii corespunzători se disting prin „aromele leptonice“. Vezi lepton.

ATLAS. Acronim de la A Toroidal LHC Apparatus (aparat toroidal pentru LHC), unul din cei doi detectori implicați în căutarea bosonului Higgs la marele accelerator de hadroni (LHC) de la CERN.

Atom. De la cuvântul grecesc *atomos*, care înseamnă indivizibil. Conceput inițial pentru a desemna constituenții ultimi ai materiei, cuvântul atom se referă acum la constituenții fundamentali ai elementelor chimice individuale. Astfel, apa constă din molecule de H_2O, care sunt compuse din doi atomi de hidrogen şi un atom de oxigen. Atomii constau, la rândul lor, din protoni şi neutroni, legați între ei pentru a forma un nucleu central, şi din electroni, ale căror funcții

de undă formează structurile caracteristice din jurul nucleului numite orbitali.

Barion. De la cuvântul grecesc *barys*, care înseamnă greu. Barionii formează o subclasă a hadronilor. Sunt particule mai grele care interacționează prin forța tare, iar între ele se numără protonul şi neutronul. Sunt compuşi din triplete de cuarci.

Big bang. Termen folosit pentru a descrie „explozia cosmică" a spațiului-timp şi a materiei în primele momente de la crearea universului, acum circa 13,7 miliarde de ani. A fost născocit de fizicianul nonconformist Fred Hoyle ca termen peiorativ, dar, între timp, originea big bang a universului a fost confirmată prin dovezi indubitabile obținute din detecția şi studiul radiației cosmice de fond de microunde, reminiscența rece a radiației fierbinți care se crede că s-a desprins de materie la aproximativ 380 000 de ani după big bang.

Bilion. O mie de miliarde, sau un milion de milioane, 10^{12}, sau 1 000 000 000 000.*

Boson. Numit astfel după fizicianul indian Satyendra Nath Bose. Bosonii se caracterizează prin numere cuantice de spin întregi (1, 2, 3…) şi, ca atare, nu se supun principiului de excluziune al lui Pauli. Bosonii sunt implicați în transmiterea forțelor dintre particulele de materie şi includ fotonul (pentru forța electromagnetică), particulele W şi Z (pentru forța slabă) şi gluonii (pentru forța tare). Particulele de spin zero se numesc, de asemenea, bosoni, dar ele nu sunt implicate în transmiterea forțelor. Printre ele se numără pionii, perechile Cooper (care pot avea şi spin 1) şi bosonul Higgs. Gravitonul, particula ipotetică a câmpului gravitațional, se presupune a fi un boson cu spinul egal cu 2.

Boson Higgs. Numit astfel după fizicianul englez Peter Higgs. Toate câmpurile Higgs au particule de câmp caracteristice numite bosoni Higgs. Termenul de „boson Higgs" este în mod special rezervat pentru Higgs-ul electroslab, particula câmpului Higgs folosit pentru prima dată în 1967–1968 de Steven Weinberg şi Abdus Salam pentru a explica ruperea simetriei electroslabe. O particulă care sea-

* În engleză, *billion* înseamnă „miliard", iar *trillion* înseamnă „bilion". (*N. ed.*)

mănă foarte mult cu bosonul Higgs electroslab a fost descoperită la acceleratorul LHC de la CERN pe 4 iulie 2012. Este o particulă neutră, de spin zero, cu o masă de 125 GeV.

Boson Nambu–Goldstone. Particulă fără masă, de spin 0, creată ca o consecință a ruperii spontane a simetriei, descoperită de Yoichiro Nambu în 1960 şi studiată de Jeffrey Goldstone în 1961. În mecanismul Higgs, bosonii Nambu–Goldstone devin al treilea „grad de libertate“ al unor particule cuantice care altfel nu ar avea masă (vezi figura 14, p. 92).

Calea cu opt braţe. Schemă de clasificare a particulelor cunoscute în anii ’60 în doi „octeţi“, elaborată de Gell-Mann şi, independent, de Yuval Ne’eman. Tiparele se bazează pe o simetrie globală SU(3) şi se formează reprezentând particulele în funcţie de sarcina electrică sau de izospinul total şi de stranietate (vezi figura 10, p. 75). Tiparele au fost explicate în cele din urmă prin modelul cuarcilor (figura 12, p. 86).

Câmp cuantic. În teoria clasică a câmpului, unui „câmp de forţe“ i se atribuie o valoare în fiecare punct din spaţiu-timp, iar el poate fi scalar (are doar mărime, nu şi direcţie) sau vectorial (are mărime şi direcţie). „Liniile de forţă“ pe care le observăm când presărăm pilitură de fier pe o bucată de hârtie pusă deasupra unui magnet constituie o reprezentare vizuală a unui astfel de câmp. Într-o teorie cuantică de câmp, forţele se transmit prin oscilaţiile câmpului care formează unde şi – deoarece undele pot fi interpretate şi ca particule – prin particulele cuantice ale câmpului. Această idee poate fi extinsă dincolo de purtătorii de forţă (care sunt bosoni de spin 1) pentru a include particulele de materie (fermionii). Astfel electronul este cuanta câmpului electronic şi aşa mai departe.

Câmp Higgs. Numit astfel după fizicianul englez Peter Higgs. Termen generic folosit pentru orice câmp de energie de fond, introdus într-o teorie cuantică de câmp pentru a declanşa ruperea simetriei prin mecanismul Higgs. Existenţa câmpului Higgs utilizat pentru a rupe simetria într-o teorie cuantică de câmp a forţei electroslabe este susţinută puternic de descoperirea noii particule la CERN.

CERN. Acronim de la Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Consiliul European pentru Cercetări Nucleare). Şi-a schimbat numele în Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (Organizaţia Europeană pentru Cercetări Nucleare) atunci când

consiliul provizoriu a fost dizolvat, dar acronimul s-a păstrat. CERN se află în nord-vestul suburbiilor Genevei, în apropierea graniței dintre Elveția şi Franța.

CMS. Acronim pentru Compact Muon Solenoid (solenoid compact pentru detecția miuonilor), unul din cei doi detectori implicați în căutarea bosonului Higgs la marele accelerator de hadroni (LHC) de la CERN.

Constanta cosmologică. În 1922, teoreticianul rus Aleksandr Friedmann a găsit o clasă de soluții ale ecuațiilor lui Einstein pentru câmpul gravitațional, care descriau un univers în care spațiul-timp se dilată. La început, Einstein se opusese ideii că spațiul-timp ar putea să se dilate sau să se contracte, şi îşi ajustase un pic ecuațiile astfel încât să aibă soluții statice. Îngrijorat de faptul că gravitația convențională ar putea domina asupra materiei din univers, făcând ca ea să se prăbuşească în ea însăşi, Einstein introdusese o „constantă cosmologică" – un fel de formă negativă sau repulsivă a gravitației – pentru a contracara efectul. Când s-au înmulțit dovezile că în realitate universul se dilată, Einstein a regretat că avusese o asemenea idee, numind-o cea mai mare gafă din viața lui. Dar descoperiri ulterioare din 1998 au arătat că expansiunea universului este în realitate accelerată. Când au fost combinate cu măsurătorile din sateliți ale radiației cosmice de fond de microunde, aceste rezultate au condus la concluzia că universul e umplut cu o „energie întunecată", care reprezintă aproximativ 73% din masa-energia universului. O formă de energie întunecată necesită reintroducerea constantei cosmologice a lui Einstein.

Constanta lui Planck. Notată cu *h*. Descoperită de Max Planck în 1900. Constanta lui Planck este o constantă fizică fundamentală care reflectă mărimea cuantelor în teoria cuantică. De exemplu, energiile fotonilor se determină din frecvențele radiației corespunzătoare conform relației $E = h\nu$, adică energia este egală cu constanta lui Planck înmulțită cu frecvența radiației. Constanta lui Planck are valoarea de $6{,}626 \times 10^{-34}$ joule secundă.

Cuantă. Unitate fundamentală, indivizibilă a unor mărimi fizice precum energia sau momentul cinetic. În teoria cuantică se admite că aceste mărimi nu sunt variabile continue, ci sunt organizate în pachete sau „grămăjoare" discrete, numite cuante. Utilizarea acestui termen este extinsă pentru a include particulele. Astfel, fotonul este

particula cuantică a câmpului electromagnetic. Ideea poate fi extinsă dincolo de purtătorii de forță, pentru a include chiar şi particulele de materie. Electronul este identificat cu cuanta câmpului electronic şi aşa mai departe. Această identificare se numeşte uneori cuantificarea a doua.

Cromodinamica cuantică (*quantum chromodynamics* sau **QCD**). Teoria cuantică de câmp bazată pe grupul SU(3), care descrie forța tare de culoare dintre cuarci, transmisă printr-un sistem de opt gluoni colorați.

Cuarc. Constituent elementar al hadronilor. Toți hadronii sunt compuşi din triplete de cuarci de spin ½ (barionii) sau combinații de cuarci şi anticuarci (mezonii). Cuarcii formează trei generații, fiecare având câte doi cuarci cu „arome“ diferite. Cuarcii up şi down, cu sarcinile electrice +2/3 şi –1/3 şi masele în intervalul 1,7–3,3 MeV şi, respectiv, 4,1–5,8 MeV, formează prima generație. Protonii şi neutronii sunt compuşi din cuarci up şi down. Cea de-a doua generație constă din cuarcii charm şi strange, cu sarcinile electrice +2/3 şi –1/3 şi masele de 1,27 GeV şi, respectiv, 101 MeV. Cea de-a treia generație constă din cuarcii top şi bottom, cu sarcinile electrice +2/3 şi –1/3 şi masele de 4,19 GeV şi, respectiv, 172 GeV. Cuarcii au în plus o sarcină de culoare, fiecare tip sau aromă având o sarcină roşie, verde sau albastră.

Cuarcul bottom. Numit uneori şi cuarcul „beauty“ [frumusețe]. Cuarc de generația a treia cu sarcina –1/3, spinul ½ (este fermion) şi o „masă elementară“ de 4,19 GeV. A fost descoperit la Fermilab în 1977, prin observarea lui upsilon, un mezon format din cuarcii bottom şi antibottom.

Cuarcul charm. Cuarc de generația a doua cu sarcina +2/3, spinul ½ (este fermion) şi o „masa elementară“ de 1,27 GeV. A fost descoperit simultan la Brookhaven National Laboratory şi la SLAC în aşa-numita „revoluție din noiembrie“ din 1974, prin observarea lui J/ψ, un mezon format dintr-un cuarc charm şi un cuarc anti-charm.

Cuarcul strange. Cuarc din cea de-a doua generație, cu sarcina –1/3, spinul ½ (fermion) şi masa de 101 MeV. Proprietatea de „stranietate“ a fost identificată de Murray Gell-Mann şi, independent, de Kazuhiko Nishijima şi Tadao Nakano drept o caracteristică a unor particule de mase relativ joase descoperite în anii ’40 şi ’50. Această proprietate a fost ulterior explicată de Gell-Mann şi George Zweig

prin prezența în aceste particule compuse a cuarcului strange (vezi figura 12, p. 86).

Cuarcul top. Numit uneori şi cuarcul „truth" [adevăr]. Cuarc din cea de-a treia generaţie, cu sarcina 2/3, spinul ½ (fermion) şi masa de 172 GeV. A fost descoperit la Fermilab în 1995.

Curenți neutri (forța slabă). Interacții între particulele elementare care nu implică nici o schimbare a sarcinii electrice. Acestea se pot produce prin schimbul unei particule Z^0 virtuale sau schimbul simultan al particulelor W^+ şi W^- (vezi figurile 15 şi 16, pp. 102, 124).

Deplasare Lamb. O mică diferență între două nivele de energie electronice în atomul de hidrogen, descoperită de Willis Lamb şi Robert Retherford în 1947. Deplasarea Lamb a oferit un indiciu important care a condus la elaborarea renormării şi, cele din urmă, a electrodinamicii cuantice.

Dualismul undă–particulă. Proprietate fundamentală a tuturor particulelor cuantice, care prezintă şi un comportament de undă nelocalizată (de pildă, produc interferență şi difracție), şi un comportament de particulă localizată, în funcție de tipul de aparat folosit pentru a efectua măsurători asupra lor. A fost sugerat de Louis de Broglie în 1921 ca o proprietate a particulelor de materie cum sunt electronii.

Electrodinamica cuantică (*quantum electrodynamics* sau **QED**). Teoria cuantică de câmp bazată pe grupul U(1), care descrie forța electromagnetică dintre particulele încărcate cu sarcină electrică, transmisă prin fotoni.

Electron. Descoperit în 1897 de fizicianul englez J.J. Thompson. În Modelul Standard, electronul este un lepton din prima generaţie, cu sarcina –1, spinul ½ (este fermion) şi masa de 0,51 MeV.

Electronvolt (eV). Un electronvolt este cantitatea de energie pe care o câştigă un electron atunci când este accelerat sub o diferență de potențial de un volt. Un bec de 100 W consumă energie cu o rată de circa 600 de miliarde de miliarde electronvolți pe secundă.

Element. Filozofii Greciei antice credeau că toată substanța materială este compusă din patru elemente – pământ, aer, foc şi apă. Un al cincilea element, numit eter sau „chintesență", a fost introdus de Aristotel pentru a descrie corpurile cereşti neschimbătoare. Astăzi, aceste elemente clasice au fost înlocuite printr-un sistem de elemente chimice. Ele sunt „fundamentale" în sensul ca elementele

chimice nu se pot transforma unul în altul prin mijloace chimice, ceea ce înseamnă că un element constă dintr-un singur tip de atomi. Elementele sunt organizate într-un „tabel periodic“, de la hidrogen la uraniu şi dincolo de uraniu.

Factor g. Constanta de proporţionalitate dintre momentul cinetic (cuantificat) al unei particule elementare sau compuse şi momentul ei magnetic, mărime care descrie efectul de rotaţie exercitat asupra particulei de un câmp magnetic extern. Pentru electron există trei factori g: unul asociat cu spinul lui, unul asociat cu momentul cinetic al electronului în mişcarea sa orbitală într-un atom şi unul asociat cu suma dintre spin şi momentul cinetic orbital. Teoria cuantică relativistă a lui Dirac pentru electron prezice pentru factorul g de spin al electronului valoarea 2. Valoarea recomandată de grupul de experţi ai CODATA* în 2006 este de 2,002319343622. Diferenţa se datorează efectelor electrodinamicii cuantice.

Fermion. Numit astfel după fizicianul italian Enrico Fermi. Fermionii se caracterizează prin spini semiîntregi (½, ³⁄₂ etc) şi includ cuarcii, leptonii şi multe particule compuse, formate din diverse combinaţii de cuarci, cum sunt barionii.

Forţa de culoare. Forţa tare care leagă cuarcii şi gluonii în interiorul hadronilor. Spre deosebire de forţele mai cunoscute, cum sunt gravitaţia şi electromagnetismul, forţa de culoare prezintă libertate asimptotică – în limita asimptotică a distanţei nule dintre ei, cuarcii se comportă ca şi cu ar fi complet liberi. Forţa nucleară tare, care leagă protonii şi neutronii între ei în interiorul nucleelor atomice, este considerată a fi o „reminiscenţă“ a forţei de culoare, care leagă cuarcii în interiorul nucleonilor.

Forţa electromagnetică. Electricitatea şi magnetismul au fost recunoscute drept componentele unei singure forţe fundamentale datorită contribuţiei câtorva fizicieni experimentatori şi teoreticieni, în principal a fizicianului englez Michael Faraday şi a teoreticianului scoţian James Clerk Maxwell. Forţa electromagnetică leagă electronii de nuclee în interiorul atomilor, şi tot ea leagă atomii unul de altul pentru a forma marea diversitate a substanţelor moleculare.

---

* Comitetul de Date pentru Ştiinţă şi Tehnologie (în engleză, Committee on Data for Science and Technology), comitet interdisciplinar al Consiliului Internaţional pentru Ştiinţă. (*N. t.*)

Forța electroslabă. În ciuda diferenței mari de scală dintre forța electromagnetică şi forța nucleară slabă, ele sunt fațete a ceea ce a fost cândva o forță electroslabă unificată, care se presupune că a acționat în „epoca electroslabă", între 10^{-36} şi 10^{-12} secunde după big bang. Combinarea forței electromagnetice cu forța nucleară slabă într-o teorie de câmp SU(2)× U(1) a fost realizată mai întâi de Steven Weinberg şi, independent, de Abdus Salam în 1967–1968.

Forța gravitațională. Forța de atracție care se exercită între toate corpurile cu masă. Gravitația este extrem de slabă şi nu joacă nici un rol în interacțiile dintre atomi, particulele subatomice şi particulele elementare, care sunt guvernate în schimb de forța de culoare, de forța nucleară slabă şi de electromagnetism. Forța gravitațională e descrisă de teoria generală a relativității a lui Einstein.

Forța slabă. Numită astfel deoarece e mult mai slabă decât forța tare şi decât forța electromagnetică, atât în ce priveşte intensitatea, cât şi raza de acțiune. Forța slabă afectează atât cuarcii, cât şi leptonii, iar interacțiile prin forța slabă pot să schimbe tipul sau aroma cuarcilor şi a leptonilor, transformând, de exemplu, un cuarc up într-un cuarc down şi un electron într-un neutrin electronic. Forța slabă a fost prima oară identificată ca o nouă forță fundamentală în studiul dezintegrării beta. Purtătorii forței slabe sunt particulele W şi Z. Forța slabă a fost combinată cu electromagnetismul în teoria cuantică de câmp SU(2)×U(1) a forței electroslabe de către Steven Weinberg şi Abdus Salam în anii 1967–1968.

Forța tare. Forța nucleară tare, sau forța de culoare, leagă cuarcii şi gluonii în interiorul hadronilor şi este descrisă de cromodinamica cuantică. Forța care leagă protonii şi neutronii între ei în interiorul nucleelor atomice (cunoscută şi ca forța nucleară tare) e considerată a fi un rezultat al forței de culoare care leagă cuarcii înăuntrul nucleonilor. Vezi forța de culoare.

Foton. Particulă elementară care stă la baza tuturor formelor de radiație electromagnetică, inclusiv lumina. Fotonul este un boson fără masă, cu spinul 1, care acționează ca purtător al forței electromagnetice.

Funcție de undă. Descrierea matematică prin „unde de materie" a particulelor, de exemplu a electronilor, conduce la ecuații caracteristice mişcării ondulatorii. Asemenea ecuații de undă conțin o funcție de undă ale cărei amplitudine şi fază variază în spațiu şi timp. Funcțiile de undă ale electronului în atomul de hidrogen formează

structuri tridimensionale caracteristice în jurul nucleului, numite orbitali. Mecanica ondulatorie – exprimarea mecanicii cuantice în funcție de undele de materie – a fost elaborată pentru prima oară de Erwin Schrödinger în 1926.

Giga. Prefix care desemnează un miliard. Un giga electronvolt (GeV) este un miliard de electronvolți, 10^9 eV, sau 1 000 MeV.

Gluon. Purtătorul forței tari de culoare dintre cuarci. Cromodinamica cuantică necesită opt gluoni fără masă care au ei înşişi sarcină de culoare. În consecință, gluonii participă şi ei la forță, şi nu doar o transmit de la o particulă la alta. 99% din masa protonilor şi neutronilor se presupune că este energie purtată de gluoni.

Grad de libertate. Numărul de dimensiuni care sunt accesibile unui sistem sau în care sistemul este liber să se mişte. O particulă clasică e liberă să se mişte în trei dimensiuni spațiale. Fotonii sunt particule de spin 1 fără masă şi, ca atare, sunt constrânşi să se mişte doar în două dimensiuni, manifestate ca o polarizare circulară stângă şi una dreaptă, sau o polarizare verticală şi una orizontală. În mecanismul Higgs, bosonii fără masă pot câştiga un al treilea grad de libertate absorbind un boson scalar Nambu–Goldstone, vezi figura 14, p. 92.

Graviton. Particulă ipotetică ce transmite forța gravitațională în teoriile cuantice de câmp ale gravitației. Deşi s-au făcut multe încercări de a construi o asemenea teorie, până în prezent nici una n-a fost considerată reuşită. Dacă există, gravitonul ar fi un boson de spin 2, fără masă şi fără sarcină electrică.

Grupul de simetrie SU(2). Grupul unitar special al transformărilor liniare a două variabile complexe. Identificat de Chen Ninh Yang şi Robert Mills ca fiind grupul de simetrie pe care ar trebui să se bazeze o teorie cuantică de câmp a forței nucleare tari, SU(2) a fost ulterior identificat drept simetria forței slabe şi, combinat cu simetria U(1) a teoriei de câmp a electromagnetismului, formează teoria de câmp SU(2)×U(1) a forței electroslabe.

Grupul de simetrie SU(3). Grupul unitar special al transformărilor liniare a trei variabile complexe. Utilizat de Murray Gell-Mann si Yuval Ne’eman ca simetrie globală pe care a fost construită „Calea cu opt brațe“. Ulterior a fost folosit de Gell-Mann, Harald Fritzsch şi Heinrich Leutwyler ca simetrie locală pentru teoria cuantică de câmp a forței nucleare tari (de culoare) dintre cuarci şi gluoni.

Grupul de simetrie U(1). Grupul unitar al transformărilor liniare ale unei variabile complexe. Este echivalent (sau „izomorf“) cu grupul multiplicativ al tuturor numerelor complexe cu valoarea absolută egală cu unitatea (cu alte cuvinte, cercul unitate din planul complex). Este izomorf şi cu SO(2), grupul ortogonal special care descrie transformarea de simetrie implicată în rotația unui obiect în două dimensiuni. În electrodinamica cuantică, U(1) este identificat cu simetria de fază a funcției de undă a electronului (vezi figura 7, p. 46).

Hadron. Termen derivat din cuvântul grecesc *hadros*, care înseamnă gros sau greu. Hadronii formează o clasă de particule care interacționează prin forța nucleară tare şi sunt formate din diverse combinații de cuarci. Această clasă include barionii, care sunt compuşi din trei cuarci, şi mezonii, care sunt compuşi dintr-un cuarc şi un anticuarc.

Inflația cosmică. Expansiune exponențială rapidă a universului, care se consideră că s-a produs între 10^{-36} şi 10^{-32} secunde după big bang. Descoperită în contextul teoriilor unificate GUT de fizicianul american Alan Guth în 1980, inflația poate explica structura la scară mare a universului pe care o observăm astăzi.

Izospin. Cunoscut şi ca spin izotopic sau spin izobaric. Introdus de Werner Heisenberg în 1932 pentru a explica simetria dintre protonul şi neutronul nou descoperiți. Simetria de izospin este acum înțeleasă ca fiind un caz particular al simetriei mai generale de aromă a interacțiilor hadronice. Izospinul unei particule poate fi calculat din numărul de cuarci up şi down pe care îi conține (vezi pp. 84–85).

Împrăştiere profund inelastică. Un tip de eveniment de ciocnire în care o mare parte din energia particulei accelerate (de exemplu, un electron) este folosită pentru distrugerea particulei-țintă (de exemplu, un proton). Particula accelerată ricoşează în urma ciocnirii cu o energie considerabil mai mică, iar simultan e produs un jet de diferiți hadroni.

Kaon. Grup de mezoni de spin 0 alcătuiți dintr-un cuarc up sau down şi un anticuarc strange, sau din anticuarcii corespunzători. Aceştia sunt K^+ (up–antistrange), K^- (strange–antiup) şi K^0 (amestecuri de down–antistrange şi strange–antidown) cu mase de 494 MeV ($K^{\pm}$) şi 498 MeV (K^0 şi anti K^0).

Lambda-CDM. Prescurtare de la *lambda-cold dark matter* (materie întunecată rece). Este cunoscut şi ca „Modelul Standard" al cosmologiei big bang. Modelul lambda-CDM explică structura pe scară largă a universului, radiaţia cosmică de fond în domeniul microundelor, expansiunea accelerată a universului şi distribuţia elementelor precum hidrogenul, heliul, litiul şi oxigenul. Modelul presupune că 73% din masa-energia universului este energie întunecată (care se reflectă în mărimea constantei cosmologice, lambda) şi 22% este materie întunecată rece, lăsând pentru universul vizibil – galaxiile, stelele şi planetele cunoscute – un rest de doar 5%.

Lege de conservare. Lege fizică ce afirmă că o anumită proprietate măsurabilă a unui sistem izolat nu se schimbă atunci când sistemul evoluează în timp. Între proprietăţile măsurabile pentru care s-au stabilit legi de conservare se numără energia, impulsul, momentul cinetic, sarcina electrică şi cea de culoare, izospinul etc. Conform teoremei lui Noether, fiecare lege de conservare poate fi pusă în legătură cu o anumită simetrie continuă a sistemului.

LEP. Acronim de la Large Electron-Positron Collider (marele accelerator pentru ciocniri frontale electron pozitron), predecesorul LHC de la CERN.

Lepton. Termen derivat din cuvântul grecesc *leptos*, care înseamnă mic. Leptonii formează o clasă de particule care nu simt forţa nucleară tare şi care se combină cu cuarcii pentru a forma materia. Ca şi cuarcii, leptonii formează trei generaţii, care includ electronul, miuonul şi leptonul tau, cu sarcina electrică –1, spin ½ şi mase de 0,51 MeV, 106 MeV şi, respectiv, 1,78 GeV, precum şi neutrinii corespunzători. Neutrinii de tip electronic, miuonic şi tauonic nu au sarcină electrică, au spin ½ şi se crede că au mase foarte mici (necesare pentru a explica fenomenul de oscilaţie a neutrinilor, adică amestecul cuantic al aromelor care face ca neutrinii să-şi poată schimba în timp aroma sau tipul).

LHC. Acronim pentru Large Hadron Collider (marele accelerator pentru ciocniri frontale de hadroni). Acceleratorul cu cea mai înaltă energie din lume, capabil să producă energii de ciocnire proton–proton de 14 TeV. LHC are o circumferinţă de 27 de kilometri şi se află la 175 de metri sub graniţa franco-elveţiană, la CERN, în apropiere de Geneva. Operând la o energie de ciocnire proton–proton de 7 TeV şi ulterior de 8 TeV, LHC a furnizat dovezile care au condus

la descoperirea unui nou boson, susceptibil de a fi bosonul Higgs, în iulie 2012.

Libertate asimptotică. Proprietate a forței de culoare tari dintre cuarci. Forța de culoare scade în intensitate atunci când cuarcii se apropie unul de altul, astfel că, la limita distanței nule dintre cuarci (echivalentă cu limita asimptotică a unor impulsuri foarte mari), cuarcii se comportă ca şi cum ar fi complet liberi – vezi figura 17(b), p. 132.

Luminozitate. Luminozitatea unui fascicul de particule într-un accelerator este numărul de particule pe unitatea de arie şi pe unitatea de timp înmulțit cu opacitatea fasciculului-țintă (o măsură a impenetrabilității țintei față de particule). De un interes deosebit este luminozitatea integrată, care este integrala (suma) luminozității în timp, exprimată de obicei în unități de centimetru pătrat la minus unu (cm^{-2}), sau inversul unui barn (10^{24} cm^{-2}), notat ca $barn^{-1}$. Numărul de ciocniri care rezultă dintr-o anumită reacție între particulele elementare se obține simplu ca luminozitatea integrată înmulțită cu secțiunea eficace a reacției (exprimată în cm^2), care este o măsură a probabilității reacției.

Materie întunecată. Descoperită în 1934 de astronomul elvețian Fritz Zwicky ca o anomalie în masele măsurate ale galaxiilor din grupul Coma (localizat în constelația Coma Berenice) pe baza mişcărilor observate ale galaxiilor din apropierea marginii grupului, în comparație cu numărul galaxiilor observabile şi cu strălucirea totală a grupului. Aceste estimări ale maselor galaxiilor difereau printr-un factor de 400. Aproape 90% din masa necesară pentru a explica mărimea efectelor gravitaționale părea să „lipsească“ sau să fie invizibilă. Această masă lipsă a fost numită „materie întunecată“. Studiile ulterioare sugerează existența unei forme de materie întunecată numită „materia întunecată rece“. Vezi materie întunecată rece.

Materie întunecată rece (*cold dark matter*, prescurtat **CDM**). O componentă crucială a modelului lambda-CDM al cosmologiei big bang, care se presupune că reprezintă aproximativ 22% din masa-energia universului. Compoziția materiei întunecate reci este necunoscută, dar se presupune ca ea constă în principal din materie „nebarionică“, adică din materie care nu conține protoni şi neutroni, şi care cel mai probabil nu aparține Modelului Standard. Printre candidați se numără aşa-numitele particule masive care interacționează slab (*weakly interacting massive particles*, sau WIMP). Ele au multe dintre pro-

prietățile neutrinilor, dar trebuie să fie mult mai masive, şi de aceea se mişcă mult mai lent. Unele generalizări supersimetrice ale Modelului Standard sugerează că aceste particule ar putea fi neutralinii.

Mecanism Higgs. Numit astfel după fizicianul englez Peter Higgs, dar menționat adesea şi cu numele celorlalți fizicieni care au descoperit în mod independent mecanismul în 1964. Un nume alternativ este Brout–Englert–Higgs–Hagen–Guralnik–Kibble – BEHHGK, sau mecanismul „beck“, după fizicienii Robert Brout, Francois Englert, Peter Higgs, Carl Hagen, Gerald Guralnik şi Tom Kibble. Mecanismul descrie modul în care un câmp de fond – numit câmp Higgs – poate fi adăugat într-o teorie cuantică de câmp pentru a rupe simetria teoriei. În 1967–1968, Steven Weinberg şi Abdus Salam au folosit în mod independent mecanismul pentru a elabora o teorie de câmp a forței electroslabe.

Mega. Prefix pentru un milion. Un mega electronvolt (MeV) este egal cu un milion de electronvolți, 10^6 eV sau 1 000 000 eV.

Mezon. Termen derivat din cuvântul grecesc *mesos*, care înseamnă „mijlociu“. Mezonii sunt o subclasă a hadronilor. Ei exercită şi simt forța nucleară tare şi sunt compuşi din cuarci şi anticuarci.

Miliard. O mie de de milioane, 10^9 sau 1 000 000 000.

MIT. Acronim pentru Massachusetts Institute of Technology (Institutul Tehnologic din Massachusetts).

Miuon. Lepton din cea de-a doua generație, echivalent cu electronul, cu sarcina –1, spinul ½ (fermion) şi masa de 106 MeV. Descoperit în 1936 de Carl Anderson şi Seth Neddermeyer.

Modelul Standard al cosmologiei big bang. Vezi modelul lambda-CDM.

Modelul Standard al fizicii particulelor. Modelul teoretic acceptat în prezent care descrie particulele de materie şi forțele dintre ele, cu excepția gravitației. Modelul Standard constă dintr-un ansamblu de teorii cuantice de câmp cu simetriile locale SU(3) (pentru forța de culoare) şi SU(2)×U(1) (pentru forța slabă şi electromagnetism). Modelul conține trei generații de cuarci şi leptoni, fotonul, particulele W şi Z, gluonii forței de culoare şi bosonul Higgs.

Mol. Unitate standard pentru cantitatea de substanță, care conține un număr de grame egal cu masa atomică sau moleculară relativă. Un mol conține $6{,}033 \times 10^{23}$ particule. Numele derivă de la „moleculă“.

Moleculă. Unitate fundamentală a unei substanțe chimice, formată din doi sau mai mulți atomi. O moleculă de oxigen constă din doi atomi de oxigen, O_2. O moleculă de apă constă din doi atomi de hidrogen şi un atom de oxigen, H_2O.

MSSM. Acronim de la *Minimum Supersymmetric Standard Model* (modelul supersimetric minimal standard), generalizarea minimală a Modelului Standard convențional al fizicii particulelor, care include supersimetria, elaborat în 1981 de Howard Georgi şi Savas Dimopoulos.

NAL. Acronim de la National Accelerator Laboratory (Laboratorul Național de Aceleratori) din Chicago. Devenit Fermi National Accelerator Laboratory, sau „Fermilab“, în 1974.

Neutrin. Numit şi „neutrino“, care înseamnă „neutru şi mic“ în italiană. Neutrinii sunt partenerii fără sarcină, de spin ½ (fermioni), ai celor trei leptoni încărcați negativ, electronul, miuonul şi tauonul. Se admite că neutrinii posedă mase foarte mici, necesare pentru a explica fenomenul de oscilație a neutrinilor, adică amestecul cuantic al aromelor care face ca neutrinii să-şi poată schimba în timp aroma sau tipul. Oscilațiile neutrinilor rezolvă problema neutrinilor solari – faptul că numerele de neutrini care străbat Pământul, determinate experimental, sunt în contradicție cu numerele de neutrini electronici estimate din reacțiile nucleare ce au loc în miezul Soarelui. În 2001 s-a determinat că doar 35% dintre neutrinii din Soare sunt neutrini de tip electronic – restul sunt neutrini miuonici şi tauonici, ceea ce indică faptul că tipurile de neutrini oscilează atunci când se propagă de la Soare până pe Pământ.

Neutron. Particulă subatomică neutră electric, descoperită în 1932 de James Chadwick. Neutronul este un barion constând dintr-un cuarc up şi doi cuarci down, cu spinul ½ şi masa de 940 MeV.

Nucleu. Regiunea densă din centrul unui atom, în care e concentrată aproape toată masa atomului. Nucleele atomilor constau din diverse numere de protoni şi neutroni. Nucleul unui atom de hidrogen constă dintr-un singur proton.

Număr complex. Un număr format înmulțind un număr real cu rădăcina pătrată din –1, notată *i*, se numeşte imaginar. Pătratul unui număr imaginar este un număr negativ, de exemplu pătratul lui 5*i* este –25. Un număr complex este suma dintre un număr real şi unul imaginar. Numerele complexe sunt folosite pe scară largă în matematică pentru a rezolva probleme care sunt imposibil de rezolvat folosind doar numere reale.

Număr cuantic. Descrierea stării fizice a unui sistem cuantic necesită specificarea proprietăților lui în funcție de energia totală, impuls şi moment cinetic, sarcină electrică etc. O consecință a cuantificării unor asemenea proprietăți este apariția în această descriere a unor multipli regulați ai cuantelor asociate. De exemplu, momentul cinetic asociat cu spinul unui electron este fixat la valoarea ½ $h/(2\pi)$, unde *h* este constanta lui Planck. Numerele întregi sau semiîntregi care înmulțesc mărimile cuantelor se numesc numere cuantice. Când e plasat într-un câmp magnetic, spinul electronului poate fi orientat de-a lungul liniilor câmpului sau în sens contrar, dând naştere orientărilor „spinul în sus“ sau „spinul în jos“, caracterizate prin numerele cuantice +½ şi –½. Alte exemple sunt numărul cuantic principal, *n*, care caracterizează nivelele de energie ale electronilor în atomi, sarcina electrică, sarcina de culoare a cuarcilor etc.

Particulă beta. Un electron de mare viteză emis de nucleul unui atom care suferă o dezintegrare radioactivă beta. Vezi radioactivitate/dezintegrare beta.

Particulele W şi Z. Particule elementare care transmit forța slabă. Particulele W sunt bosoni de spin 1, cu o unitate de sarcină electrică pozitivă (W^+) sau negativă (W^-) şi masa de 80 GeV. Particula Z^0 este un boson neutru electric de spin 1, cu masa de 91 GeV. Particulele W şi Z capătă masă prin mecanismul Higgs, şi pot fi considerate un fel de fotoni „grei“.

Parton. Nume inventat de Richard Feynman în 1968 pentru a descrie „părțile“ constituente, aparent punctiforme, ale protonilor şi neutronilor. Ulterior s-a arătat că partonii sunt cuarci şi gluoni.

Pereche Cooper. La o răcire sub temperatura critică, electronii dintr-un supraconductor simt o atracție reciprocă slabă. Electronii cu spini şi impulsuri opuse se combină pentru a forma perechi Cooper, care se mişcă prin rețeaua metalică în mod cooperativ, mişcarea lor fiind mediată sau facilitată de vibrațiile rețelei. Astfel de perechi de

electroni au spinul 0 sau 1, fiind deci bosoni. În consecință, nu există nici o restricție asupra numărului de perechi care pot ocupa o singură stare cuantică, iar la temperaturi joase ele se pot „condensa“, construind starea până la dimensiuni macroscopice. Perechile Cooper din această stare nu simt nici o rezistență la deplasarea prin rețea, iar rezultatul este supraconductibilitatea.

Pioni. Grup de mezoni de spin 0 formați din cuarci up şi down şi anticuarcii lor. Aceştia sunt π^+ (up–antidown), π^- (down–antiup) şi π^0 (un amestec de up–antiup şi down–antidown), cu masele de 140 MeV ($\pi^\pm$) şi 135 MeV (π^0).

Pozitron. Antiparticula electronului, notată ca e^+, cu sarcina +1, spinul ½ (fermion) şi masa de 0,51 MeV. Pozitronul a fost prima antiparticulă descoperită, în 1932, de Carl Anderson.

Principiul de excluziune al lui Pauli. Descoperit de Wolfgang Pauli în 1925. Principiul de excluziune afirmă că doi electroni nu pot ocupa aceeaşi stare cuantică (adică nu pot să aibă acelaşi set de numere cuantice) simultan. Pentru electroni, aceasta înseamnă că un orbital atomic poate fi ocupat de cel mult doi electroni, cu condiția ca aceştia să aibă spinii opuşi.

Principiul de incertitudine. Descoperit de Werner Heisenberg în 1927. Principiul de incertitudine afirmă că există o limită fundamentală în precizia cu care se pot măsura perechile de observabile „conjugate“, cum sunt poziția şi impulsul. Principiul poate fi asociat cu dualismului fundamental al comportării obiectelor cuantice atât ca unde, cât şi ca particule.

Proton. Particulă subatomică încărcată pozitiv, descoperită şi numită astfel de Ernest Rutherford în 1919. Rutherford a stabilit de fapt că nucleul atomului de hidrogen (care este format dintr-un singur proton) e un constituent fundamental al altor nuclee atomice. Protonul este un barion constând din doi cuarci up şi un cuarc down, cu spinul ½ şi masa de 938 MeV.

Radiația cosmică de fond de microunde. La aproximativ 380 000 de ani după big bang, universul se dilatase şi se răcise suficient pentru a permite ca nucleele de hidrogen (protonii) şi nucleele de heliu (constând din doi protoni şi doi neutroni) să se recombine cu electronii pentru a forma atomi neutri de hidrogen şi de heliu. În acel moment, universul a devenit „transparent“ pentru radiația reziduală

fierbinte. Expansiunea ulterioară a deplasat şi a răcit această radiaţie fierbinte până în zona de microunde cu o temperatură de doar 2,7 K (–270,5º C), puţin peste zero absolut. Această radiaţie de fond de microunde a fost prezisă de câţiva teoreticieni şi a fost descoperită în mod întâmplător de Arno Penzias şi Robert Wilson în 1964. Sateliţii COBE şi WMAP au studiat de atunci în detaliu această radiaţie.

Radioactivitate/dezintegrare beta. Descoperită de fizicianul francez Henri Becquerel în 1896 şi numită astfel de Ernest Rutherford în 1899. Exemplu de dezintegrare prin forţa slabă, ea implică transformarea unui cuarc down dintr-un neutron într-un cuarc up, transformând neutronul într-un proton cu emisia unei particule W^-. Particula W^- se dezintegrează într-un electron de mare viteză („particula beta“) şi un antineutrin electronic.

Raze cosmice. Fluxuri de particule încărcate de energie înaltă din spaţiul cosmic, care pătrund în permanenţă în atmosfera superioară a Pământului. Folosirea termenului de „rază“ datează de la începuturile studierii radioactivităţii, când fluxurile dirijate de particule încărcate erau numite „raze“. Razele cosmice provin din numeroase surse, incluzând procesele de energie înaltă care au loc la suprafaţa Soarelui şi a altor stele, precum şi procese încă necunoscute, care au loc în altă parte în univers. Energiile particulelor din razele cosmice sunt situate de regulă între 10 MeV şi 10 GeV.

Relativitate generală. Elaborată de Einstein în 1915, teoria generală a relativităţii încorporează relativitatea restrânsă şi legea gravitaţiei universale a lui Newton într-o teorie geometrică a gravitaţiei. Einstein a înlocuit „acţiunea la distanţă“ implicită în teoria gravitaţiei universale a lui Newton cu mişcarea corpurilor masive într-un spaţiu-timp curbat. În relativitatea generală, materia îi spune spaţiului-timp cum să se curbeze, iar spaţiul-timp curbat îi spune materiei cum să se mişte.

Relativitate restrânsă. Elaborată de Einstein în 1905, teoria restrânsă a relativităţii susţine că orice mişcare e relativă şi că nu există un sistem de referinţă unic sau privilegiat faţă de care mişcarea să poată fi măsurată. Toate sistemele de referinţă inerţiale (adică, în mişcare uniformă unele faţă de altele) sunt echivalente – un observator staţionar pe Pământ ar trebui să obţină aceleaşi rezultate pentru acelaşi set de măsurători fizice ca un observator în mişcare

uniformă pe o navă spațială. Se exclud astfel noțiunile clasice de spațiu şi timp absolut, repaus absolut şi simultaneitate. În formularea teoriei, Einstein a presupus că viteza luminii în vid reprezintă o viteză maximă ce nu poate fi depăşită. Teoria e „restrânsă“ doar în sensul că nu se referă la mişcarea accelerată; aceasta e luată în considerare în teoria generală a relativității a lui Einstein.

Renormare. O consecință a introducerii particulelor în teoria câmpului este că acestea pot suferi interacții proprii, adică pot interacționa cu propriile lor câmpuri. Aceasta face ca tehnicile folosite pentru rezolvarea ecuațiilor de câmp, de pildă teoria perturbațiilor, să eşueze, deoarece termenii de interacție proprie apar ca nişte corecții infinite. Renormarea a fost elaborată ca o metodă matematică pentru a elimina aceşti termeni de interacții proprii, prin redefinirea parametrilor (ca masa şi sarcina) ce caracterizează particulele de câmp înseşi.

Ruperea simetriei. Ruperea spontană a simetriei are loc ori de câte ori starea de energie minimă a unui sistem fizic are o simetrie mai joasă decât stările de energie mai mare. Când sistemul pierde energie şi ajunge în starea lui de energie minimă, simetria se reduce, sau „se rupe“, în mod spontan. De exemplu, un creion în echilibru perfect pe vârful lui este simetric, dar se va roti către o stare mai stabilă, de energie mai joasă şi mai puțin simetrică, în care creionul se află de-a lungul unei anumite direcții.

Sarcină electrică. Proprietate intrinsecă pe care o au cuarcii şi leptonii (şi, în termeni mai familiari, protonii şi electronii). Sarcina electrică există în două varietăți – pozitivă şi negativă –, iar curgerea sarcinilor negative reprezintă curentul electric care stă la baza electrificării şi a multe ramuri ale industriei moderne.

Sarcină de culoare. Proprietate a cuarcilor în plus față de aromă (up, down, strange etc.). Spre deosebire de sarcina electrică, ce apare în două varietăți – pozitivă şi negativă –, sarcina de culoare apare în trei varietăți – roşie, verde şi albastră. Evident, folosirea acestor nume nu implică faptul că, în sensul obişnuit, cuarcii sunt „colorați“. Forța de culoare dintre cuarci e transmisă de gluonii colorați.

Simetrie de etalonare. Nume inventat de matematicianul german Hermann Weyl. Când ideea se aplică teoriilor cuantice de câmp, se alege o simetrie „de etalonare“ față de care ecuațiile să fie invariante – modificări arbitrare ale etalonării nu influențează rezultatele

prezise. Legătura dintre simetria de etalonare şi legile de conservare (vezi legi de conservare şi teorema lui Noether) înseamnă că alegerea corectă a simetriei de etalonare poate conduce la o teorie de câmp care să respecte automat cerința de conservare a proprietății considerate.

Sincrotron. Un tip de accelerator de particule în care câmpurile electrice variabile, folosite pentru a accelera particulele, şi câmpurile magnetice, folosite pentru a le obliga să se mişte pe un inel circular, sunt atent sincronizate cu fasciculul de particule.

SLAC. Acronim de la Stanford Linear Accelerator Center, situat în Los Altos Hills, lângă Universitatea Stanford din California.

Spin. Toate particulele elementare prezintă un tip de moment cinetic numit spin*. Deşi spinul electronului a fost interpretat inițial ca o „rotație proprie" a electronului (care s-ar învârti în jurul propriei axe, ca un titirez), spinul este un fenomen relativist şi nu are un echivalent în fizica clasică. Particulele se caracterizează prin numerele lor cuantice de spin. Particulele cu numere cuantice de spin semiîntregi se numesc fermioni. Particulele cu numere cuantice de spin întregi se numesc bosoni. Particulele elementare de materie sunt fermioni. Particulele care transmit forța sunt bosoni.

SSC. Acronim de la Superconducting Supercollider, un proiect american de a construi cel mai mare accelerator de particule din lume la Waxahachie, în comitatul Ellis din Texas, capabil să atingă energii de ciocnire proton–proton de 40 TeV. Proiectul a fost anulat de Congresul SUA în octombrie 1993.

Stranietate. Identificată ca o proprietate caracteristică a unor particule cum sunt hiperonul lambda neutru, particulele neutre şi încărcate sigma şi xi, precum şi kaonii. Stranietatea a fost folosită împreună cu sarcina electrică şi izospinul pentru a clasifica particulele conform „Căii cu opt brațe" de către Murray Gell-Mann şi Yuval Ne'eman (vezi figura 10, p. 75). Această proprietate a fost ulterior explicată prin prezența în aceste particule compuse a cuarcului strange (vezi figura 12, p. 86).

Supersimetrie (SUSY). Alternativă la Modelul Standard al fizicii particulelor, în care asimetria dintre particulele de materie (fermioni) şi

* Termen preluat din engleză, care se traduce prin „rotație". (*N. t.*)

particulele de forță (bosoni) este explicată printr-o supersimetrie ruptă. La energii înalte (de exemplu, la energiile care predominau în stadiile foarte timpurii de după big bang), supersimetria n-ar fi ruptă şi ar exista o simetrie perfectă între fermioni şi bosoni. Pe lângă asimetria dintre fermioni şi bosoni, supersimetria ruptă prezice un ansamblu de superparteneri masivi cu spinul diferit prin ½. Partenerii supersimetrici ai fermionilor se numesc sfermioni. Partenerul electronului se numeşte selectron; fiecare cuarc are ca partener scuarcul corespunzător. La fel, pentru fiecare boson există un bosin. Partenerii supersimetrici ai fotonului, ai particulelor W şi Z şi ai gluonilor sunt numiți fotin, win, zin şi gluin. Supersimetria rezolvă multe dintre problemele pe care le are Modelul Standard, dar dovezi ale existenței superpartenerilor nu au fost deocamdată găsite.

Supraconductibilitate. Descoperită de Heike Kamerlingh Onnes în 1911. Când sunt răcite sub o anumită temperatură critică, anumite materiale cristaline îşi pierd toată rezistența electrică şi devin supraconductori. Un curent electric va curge la infinit printr-un fir supraconductor fără să consume energie. Supraconductibilitatea este un fenomen cuantic explicat prin mecanismul BCS, numit după John Bardeen, Leon Cooper şi John Schrieffer.

Teorema lui Noether. Concepută de Amalie Emmy Noether în 1918, teorema leagă legile de conservare de anumite simetrii continue ale sistemelor fizice şi de teoriile care le descriu, şi sunt folosite ca instrumente în construirea unor noi teorii. Conservarea energiei reflectă faptul că legile care guvernează energia sunt invariante față de transformările continue sau „translațiile" în timp. Pentru impuls, legile sunt invariante față de translațiile continue în spațiu. Pentru momentul cinetic, legile sunt invariante față de rotațiile în spațiu, adică nu depind de *unghiul* direcției măsurat față de centrul de rotație.

Teoria perturbațiilor. Metodă matematică folosită pentru a găsi soluții aproximative ale ecuațiilor care nu pot fi rezolvate exact. Ecuația în cauză e scrisă sub forma unei dezvoltări perturbative – suma unei serii potențial infinite de termeni care începe cu o expresie „de ordin zero" care se poate rezolva exact. La aceasta se adaugă termeni suplimentari (sau, de perturbație), care reprezintă corecții de ordinul întâi, de ordinul al doilea, de ordinul al treilea etc. În principiu, fiecare termen din dezvoltare contribuie cu o corecție din ce

în ce mai mică la rezultatul de ordin zero, aducând treptat calculul din ce în ce mai aproape de rezultatul exact. Precizia rezultatului final depinde deci de numărul termenilor perturbativi incluşi în calcul. Deşi este foarte diferită ca structură, ne putem face o idee privind felul în care funcţionează dezvoltarea perturbativă dacă ne uităm la dezvoltarea în serie de puteri a unei funcţii trigonometrice simple, de pildă sin *x*. Primii câţiva termeni din dezvoltare sunt: $\sin x = x - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + \ldots$ Pentru $x = 45^o$ (0,785398 radiani), primul terment dă 0,785398, din care scădem 0,080745, apoi adăugăm 0,002490, apoi scădem 0,000037. Fiecare termen succesiv aduce o corecţie mică şi, după doar patru termeni, avem rezultatul 0,707106, care trebuie comparat cu $\sin 45^o = 0{,}707107$.

Teorie de câmp Yang–Mills. Variantă de teorie cuantică de câmp bazată pe invarianţa la etalonare, elaborată în 1954 de Chen Ning Yang şi Robert Mills. Teoria de câmp Yang–Mills stă la baza tuturor componentelor Modelului Standard actual al fizicii particulelor.

Teorie de etalonare. Teorie bazată pe o simetrie de etalonare (vezi simetrie de etalonare). Teoria generală a relativităţii a lui Einstein este o teorie de etalonare invariantă faţă de schimbările arbitrare ale sistemului de coordonate din spaţiu-timp (ale „etalonării“). Electrodinamica cuantică (QED) este o teorie cuantică de câmp invariantă la modificarea fazei funcţiei de undă a electronului. În anii ’50, elaborarea unei teorii cuantice de câmp pentru forţele nucleare tare şi slabă a devenit practic echivalentă cu identificarea unei mărimi care se conservă, şi deci a unei simetrii de etalonare convenabile.

Teorie unificată generală (*Grand Unified Theory* sau **GUT)**. Orice teorie care încearcă să unifice forţele electromagnetică, nucleară slabă şi nucleară tare într-o singură structură este un exemplu de teorie unificată generală. Primul exemplu de GUT a fost conceput de Sheldon Glashow şi Howard Georgi în 1974. Teoriile GUT nu-şi propun să includă gravitaţia; teoriile care fac acest lucru se numesc de regulă „teorii universale“ sau „teorii a tot ce există“.

Tera. Prefix pentru a desemna un bilion. Un tera electronvolt (TeV) este un bilion de electronvolţi, 10^{12} eV sau 1 000 GeV.

Valoare medie pe vid. În teoria cuantică, mărimile observabile, cum e energia, se exprimă prin aşa-numitele valori probabile (sau medii) ale operatorilor care corespund observabilelor în mecanica cuantică.

Operatorii sunt funcții matematice care acționează asupra funcțiilor de undă şi le modifică. Valoarea medie pe vid este valoarea probabilă a operatorului în vid. Din cauza formei curbei energiei potențiale a câmpului Higgs, el are o valoare medie pe vid nenulă, care rupe simetria forței electroslabe – vezi figura 13, p. 91.

BIBLIOGRAFIE

Baggott, Jim, *Beyond Measure: Modern Physics, Philosophy and the Meaning of Quantum Theory*, Oxford University Press, 2003.

Baggott, Jim, *The Quantum Story: A History in 40 Moments*, Oxford University Press, 2001.

Cashmore, Roger, Maiani, Luciano şi Revol, Jean-Pierre (ed.), *Prestigious Discoveries at CERN*, Springer, Berlin, 2004.

Crease, Robert P. şi Mann, Charles, C., *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Rutgers University Press, 1986.

Dodd, J.E., *The Ideas of Particle Physics*, Cambridge University Press, 1984.

Enz, Charles P., *No Time to Be Brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli*, Oxford Universirty Press, 2000.

Evans, Lyndon (ed.), *The Large Hadron Collider: A Marvel Of Technology*, CRC Press, London, 2009.

Farmenlo, Graham (ed.), *It Must Be Beautiful: Great Equations of Modern Science*, Granta Books, London, 2002.

Feynman, Richard P., *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin, London, 1985.

Gell-Mann, Murray, *The Quark and the Jaguar*, Little, Brown & Co., London, 1994.

Gleick, James, Genius: *Richard Feynman and Modern Physics*, Little, Brown & Co., London, 1992.

Greene, Brian, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions and the Quest for the Ultimate Theory*, Vintage Books, London, 2000. (*Universul elegant: Supercorzi, dimensiuni ascunse şi căutarea teoriei ultime*, Editura Humanitas, Bucureşti, 2010.)

Greene, Brian, *The Fabric of the Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality*, Allen Lane, London, 2004.

Gribbin, John, *Q is for Quantum: Particle Physics from A to Z*, Weidenfeld & Nicholson, London, 1998.

Guth, Alan, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Vintage, London, 1998.

Halpern, Paul, *Collider: The Search for the World's Smallest Particles*, John Wiley, New Jersey, 2009.

Hoddeson, Lillian, Brown, Laurie, Riolan, Michael şi Dresden, Max, *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Cambridge University Press, 1997.

Johnson, George, *Strage Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Vintage, London, 2001.

Kane, Gordon, *Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of the Universe*, Perseus Books, Cambridge, MA, 2000.

Kragh, Helge, *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton Universiy Press, 1999.

Lederman, Leon (cu Dick Teresi), *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?*, Bantam Books, London, 1993.

Mehra, Jagdish, *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman*, Oxford University Press, 1994.

Nambu, Yoichiro, *Quarks*, World Scientific, Singapore, 1981.

Pais, Abraham, *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982.

Pais, Abraham, *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press, 1986.

Pickering, Andrew, *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*, University of Chicago Press, 1984.

Riolan, Michael, *The Hunting of the Quark: A True Story of Modern Physics*, Simon & Schuster, New York, 1987.

Sambursky, S., *The Physical World of Greeks*, ediția a doua, Routledge & Kegan Paul, London, 1963.

Sample, Jan, *Massive: The Hunt for the God Particle*, Virgin Books, London, 2010.

Schweber, Silvan S., *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, Tomonaga*, Princeton University Press, 1994.

Stachel, John (editor), *Einstein's Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, 2005.

't Hooft, Gerard, *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press, 1997.

Veltman, Martinus, *Facts and Mysteries in Elemtary Particle Physics*, World Scientific, London, 2003.

Weinberg Steven, *Dreams of a Final Theory: The Search of the Fundamental Laws of Nature*, Vintage, London, 1993. (*Visul unei teorii finale: În căutarea legilor ultime ale naturii*, Editura Humanitas, Bucureşti, 2009.)

Weyl, Hermann, *Symmetry*, Princeton University Press, 1952.

Wilczek, Frank, *The Lightness of Being: Big Questions, Real Answers*, Allen Lane, London, 2009.

Woit, Peter, *Not Even Wrong*, Vintage Books, London, 2007.

Zee, A., *Fearful Symmetry: The Search for Beauty in Modern Physics*, Princeton University Press, 2007 (prima ediție publicată în 1986).

CUPRINS

